

# Ein Beitrag zum erdbebensicheren Konstruieren mit gipsgebundenen Plattenwerkstoffen im Holzbau

Am Fachbereich 15 – Architektur  
der Technischen Universität Darmstadt

zur  
Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieur

DISSERTATION

vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. Peter Rädcl**  
aus Marburg

Referent:  
Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. Karsten Tichclmann  
Prof. Dr.-Ing. Jörg Lange

Darmstadt 2018

Rädel, Peter: Ein Beitrag zum erdbebensicheren Konstruieren mit gipsgebundenen Plattenwerkstoffen im Holzbau  
Darmstadt, Technische Universität Darmstadt,  
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2018  
URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-75054  
Tag der mündlichen Prüfung: 17.01.2018

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International  
<https://creativecommons.org/licenses/>

## Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Beitrag zum erdbebensicheren Konstruieren mit gipsgebundenen Plattenwerkstoffen im Holzbau zu liefern. Die gipsgebundenen Plattenwerkstoffe übernehmen dabei eine tragende Funktion als Aussteifung von Gebäuden. Der Einsatz von gipsgebundenen Plattenwerkstoffen als Aussteifung ist in der industriellen Holzhausfertigung eine übliche und weit verbreitete Anwendung. Bisher gibt es keine grundlegenden Angaben zum Verhalten unter Erdbebenbeanspruchung sowie zur Bewertung der diesbezüglichen Eigenschaften. Dabei stehen das Verhalten der Verbindung von Plattenwerkstoff und Holz-Unterkonstruktion sowie durch die Gesamtgeometrie bedingte globale Effekte am Bauteil im Zentrum der hier vorliegenden Betrachtung.

Für die Anwendung von gipsgebundenen Plattenwerkstoffen werden in der vorliegenden Publikation Angaben zur Durchführung von Versuchen zur Bestimmung der Eigenschaften unter zyklischer Beanspruchung gemacht. Dazu wurden bekannte Methoden bei vergleichbaren Werkstoffen und Konstruktionen in Betracht gezogen und durch eigene neue Modifikationen auf Versuche an gipsgebundenen Plattenwerkstoffen angepasst. Es wurden Werkstoffeigenschaften an einem breiten Spektrum selbst durchgeführter Versuche an gipsgebundenen Plattenwerkstoffen bestimmt. Auftretende Schädigungsparameter und Versagensformen wurden genau betrachtet und analysiert. Die in Versuchen festgestellten Eigenschaften wurden umfassend bewertet und erstmals in vorhandene Bemessungskonzepte eingegliedert. Nachfolgend wurden die Ergebnisse an gipsgebundenen Plattenwerkstoffen mit Ergebnissen an Referenz-Proben mit Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB“ verglichen und bewertet.

Abschließend werden Empfehlungen zu Bemessungs- und Konstruktionsregeln für erdbebensicheres Konstruieren mit gipsgebundenen Plattenwerkstoffen ausgesprochen.

## Abstract

The aim of the present work is to contribute to the earthquake resistant construction with gypsum-bonded boards in timber construction. The gypsum-bonded boards take a supporting function as stiffening of buildings. The use of gypsum-bonded board materials as a stiffening element is a common and widespread application for industrial prefabricated wooden houses. So far, there is no basic information on the behavior under seismic loading as well as for the evaluation of the properties referring to this. The behavior of the combination of gypsum board and wooden substructure as well as global effects in the construction due to the global geometry are at the center of the present consideration.

For the application of gypsum-bonded panel materials, information is given in this publication on the performance of tests to determine these properties. For this purpose, known methods were considered for comparable materials and constructions and adapted by own new modifications to tests methods for gypsum-bonded boards. The properties were determined on a wide range of self-conducted tests on gypsum-bonded boards. Occurring damage parameters and failure modes were exactly examined and analyzed. The properties determined in tests were comprehensively evaluated and for the first time incorporated into existing design concepts. Subsequently, the results of gypsum-bonded boards have been compared with results on reference samples with wood-based panels of the type "OSB" and the comparison was evaluated.

Finally, recommendations for design and construction rules are given for earthquake-resistant constructions using gypsum-bonded boards.





**INHALT**

1	Einleitung	9
2	Zielsetzung	13
3	Gliederung der Arbeit	15
4	Stand der Forschung und Normung	17
4.1	Stand der Forschung	17
4.2	Stand der Normung	21
5	Vorgehensweise	23
5.1	Grundlagen	23
5.2	Verwendete Plattenwerkstoffe	23
5.3	Verbindung des Plattenwerkstoff mit der Unterkonstruktion	25
5.4	Verwendete Unterkonstruktion	26
5.5	Versuchsumfang	26
5.6	Untersuchungsmethode zum lokalen Verhalten der Verbindung an Scherkörpern	27
5.7	Untersuchungsmethode zum globalen Verhalten an Wandscheiben	31
6	Überlegungen zur Modifikation der Untersuchungs- und Auswertungsmethoden	37
6.1	Beweggründe für die Modifikation	37
6.2	Aufbringen einer Auflast bei Untersuchungen an Wandscheiben	37
6.3	Bestimmung der Fließverschiebung und Duktilität	39
6.4	Definition des Endes der zyklischen Versuche	43
6.5	Methode zur Bestimmung der Energiedissipation und Dämpfung	43
6.6	Kapazitätsspektrum-Methode	45
7	Erkenntnisse zum lokalen Verhalten der einschnittigen Verbindung	49
7.1	Allgemeine Erkenntnisse	49
7.2	Charakterisierung des Verhaltens der einschnittigen Verbindung unter zyklischer Beanspruchung	52
7.3	Betrachtung des Verbindungsmittels	64
8	Bestimmung von Schädigungsparametern der Scherkörper	69
8.1	Grundsätzliche Überlegungen zur Schädigung	69
8.2	Reduktion der Steifigkeit	69
8.3	Grenzkurve des Tragwiderstandes	72
8.4	Ansatz zur Entwicklung eines Modells mit Berücksichtigung einer Schädigung	73
9	Erkenntnisse zum globalen Verhalten der Wandscheiben	77
9.1	Allgemeine Erkenntnisse und Grundlagen	77
9.2	Beschreibung der Versagensformen	80
9.3	Erkenntnisse zur Duktilität und Dämpfung	92
10	Eingliederung der Untersuchungsergebnisse in das Bemessungskonzept	95

10.1	Allgemeines	95
10.2	Bewertung der duktilen Eigenschaften nach dem Prinzip gleicher Formänderungsarbeit	95
10.3	Duktile Eigenschaften von Scherkörpern	97
10.4	Duktile Eigenschaften von Wandscheiben	99
11	Bewertung der duktilen Eigenschaften der Wandscheiben auf Grundlage der Kapazitätsspektrum-Methode	103
12	Referenz-Untersuchungen an Wandscheiben mit einer Beplankung aus Holzwerkstoffplatten	111
12.1	Ergebnisse der Versuche an Wandscheiben mit einer Beplankung aus „OSB“	111
12.2	Modifizierung einer Wandscheibe zur Verbesserung des Verhaltens unter Erdbebenbeanspruchung	115
12.3	Betrachtung der Ankerkräfte infolge einer zyklischen Beanspruchung	120
12.4	Bewertung der duktilen Eigenschaften nach dem Prinzip gleicher Formänderungsarbeit und auf Grundlage der Kapazitätsspektrum-Methode	123
13	Gegenüberstellung der Eigenschaften unter Erdbeben von gipsgebundenen Platten und „OSB/4“-Platten	125
14	Empfehlungen	129
14.1	Empfehlung von Verhaltensbeiwerten und Überfestigkeitsfaktoren	129
14.2	Empfehlungen zu Konstruktions- und Bemessungsregeln	131
15	Zusammenfassung und Fazit	133
15.1	Allgemeines	133
15.2	Grenzen und Randbedingungen der Untersuchungen	134
15.3	Ausblick	135
16	Literaturverzeichnis	137
16.1	Veröffentlichungen	137
16.2	Normen	139
16.3	Sonstige Quellen	140
16.4	Studienarbeiten	141
17	Anhang	143
Anhang A	Übersicht der durchgeführten Versuche	143
Anhang B	Weggesteuerter zyklischer Versuchsablauf	148
Anhang C	Zyklische Verbindungsmittelversuche	149
Anhang D	Annahmen zur Kapazitätsspektrum-Methode	151

## Symbole

$A$	Fläche (Arbeit); in Nmm oder kNmm
$q$	Verhaltensbeiwert zur Berücksichtigung nichtlinearen Verhaltens beim Abtrag von Erdbebenlasten; ohne Einheiten
$\alpha$	Biegewinkel des stiftförmigen Verbindungsmittels; in °
$\alpha_u$	Überfestigkeitsfaktor zur Berücksichtigung des tatsächlichen Verhaltens von Bauteilen; ohne Einheiten
$v$	Verschiebung; in mm
$v_y$	Fließverschiebung. Verschiebung bei Erreichen der Streckgrenze; in mm
$v_{g,z,i}$	Gesamtverschiebung im Zyklus i; in mm
$v_{y,z,i}$	Verschiebung bis zum Erreichen der Fließgrenze im Zyklus i; in mm
$v_u$	Bruch-, Grenz-, oder Versagensverschiebung in mm
$b$	Breite der Wandscheibe; in mm
$b_1$	Abstand des Fließgelenks im Material 1 zur Scherfuge der einschnittigen Verbindung; in mm
$b_2$	Abstand des Fließgelenks im Material 2 zur Scherfuge der einschnittigen Verbindung; in mm
$b_{net}$	Lichter Abstand zwischen den Wandrippen; in mm
$\zeta_i$	
$D$	Duktilität; ohne Einheiten
$D_z$	Duktilität bestimmt aus zyklischem Versuch; ohne Einheiten
$E_d$	Dissipierte Energie auch Energiedissipation; in Nmm oder kNmm
$E_{d,kum}$	Kumulierte dissipierte Energie; in Nmm oder kNmm
$E_{d, Halb}$	Dissipierte Energie des Halbzyklus; in Nmm oder kNmm
$E_{d, Voll}$	Dissipierte Energie des gesamten Zyklus; in Nmm oder kNmm
$E_{p, Halb}$	Potentielle Energie des Halbzyklus; in Nmm oder kNmm
$E_{p, Voll}$	Potentielle Energie des gesamten Zyklus; in Nmm oder kNmm
$E_{d, dis, mean}$	Mittelwert der dissipierten Energie bezogen auf die Verschiebung; in Nmm/mm
$f_{h,k}$	Charakteristische Lochleibungsfestigkeit; in N/mm <sup>2</sup>
$f_{t,k}$	Charakteristische Zugfestigkeit; in N/mm <sup>2</sup>
$f_{t,90,k}$	Charakteristische Zugfestigkeit senkrecht zur Herstellrichtung; in N/mm <sup>2</sup>
$f_{v,k}$	Charakteristische Schubfestigkeit; in N/mm <sup>2</sup>
$f_{v,0,Rk}$	Charakteristischer Wert der längenbezogenen Beanspruchbarkeit einer Scheibe; in N/mm
$F$	Kraft; in N oder kN
$F_a$	Kraft im Zyklus „a“ eines Zyklenkollektivs; in N oder kN
$F_{ax,Rk}$	charakteristischer Wert der Tragfähigkeit eines stiftförmigen Verbindungsmittels auf Herausziehen; in N oder kN
$F_b$	Fundamentschub; in N oder kN
$F_{el}$	Elastischer Tragwiderstand ; in N oder kN
$F_{max}$	Maximal erreichte Kraft eines Versuchs; in N oder kN
$F_{max,a}$	Maximal erreichte Kraft im Zyklus „a“; in N oder kN
$F_{t,Rk}$	Charakteristische Abschertragfähigkeit; in N
$F_{t,el}$	Referenzwert des Tragwiderstands des elastischen Systems, in N oder kN
$F_{v,max,mean}$	Maximal in Versuchen erreichter mittlerer Tragwiderstand eines Wandscheibentyps; in N oder kN
$F_{performance}$	Wirksame Kraft bei Erreichen des Performance Point; in N oder kN
$F_{v,Rd}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit eines Wandscheibentyps; in N oder kN
$F_y$	Plastischer Tragwiderstand; in N oder kN

$k_{\text{mod}}$	Modifikationsbeiwert zur Bestimmung des Bemessungswertes; ohne Einheiten
$k_{v,1}$	Beiwert zur Berücksichtigung der verbundenen Plattenränder einer Scheibe; ohne Einheiten
$k_{v,2}$	Beiwert zur aus dem Abstand von Rippenachsen und Beplankungsmittelflächen und aus diskontinuierlichen und rechtwinklig zu den Rippenachsen gerichteten Kräften resultierenden zusätzlichen Beanspruchungen der Beplankung; ohne Einheiten
$K_{\text{el}}$	Elastische Steifigkeit; in N/mm oder kN/mm
$m_{\text{eff}}$	Effektive Masse der Modalform
$M_y$	Moment; in Nmm
$M_{y,\text{Rk}}$	Charakteristisches Fließmoment des stiftförmigen Verbindungsmittels; in Nmm
$R_{\text{el}}$	Reaktionskraft des elastischen Systems; in N oder kN
$R_{\text{nl}}$	Reaktionskraft des nichtlinearen Systems; in N oder kN
$R_{\text{nl}+\xi}$	Reaktionskraft des gedämpften nichtlinearen Systems; in N oder kN
$s$	Abstand der Verbindungsmittel; in mm
$S$	Steifigkeit; in N/mm
$S_a$	Spektralbeschleunigung; in $\text{m/s}^2$
$S_d$	Spektralverschiebung; in m
$t$	Dicke; in $\text{N/mm}^2$
$T$	Grundschwingzeit; in s
$\mathfrak{D}_{\text{eq}}$	Viskose Dämpfung bestimmt aus zyklischer Beanspruchung; ohne Einheiten
$\mu$	Verschiebeduktilität; ohne Einheiten
$\gamma_{\text{M}}$	Teilsicherheitsbeiwert für das Material; ohne Einheiten
$\eta$	Dämpfungskorrekturbeiwert; ohne Einheiten
$\xi$	Viskose Dämpfung zur Bestimmung des Dämpfungskorrekturbeiwerts; ohne Einheiten
$\varpi$	Winkelgeschwindigkeit; in $1/\text{s}$
$\rho_k$	charakteristische Rohdichte, in $\text{kg/m}^3$

## Begriffe

Äquivalenter Einmassenschwinger	Der äquivalente Einmassenschwinger besitzt die gleiche Grundfrequenz wie die zu betrachtende Struktur (Bauteil). Bei Erreichen der Resonanzfrequenz erfährt der äquivalente Einmassenschwinger die gleiche Deformation wie die Struktur.
Auflast	Eine vertikale Last die von oben in die Wandscheiben eingeleitet wird.
Amplitude	Die Amplitude ist die maximale Auslenkung einer wechselnden Größe (hier Verschiebung) bezogen auf eine Ausgangslage (z.B. hier Nullpunkt)
Antwortspektrum	Das Antwortspektrum zeigt die Reaktion eines Einmassenschwingers auf eine definierte Schwingungsanregung (im hier betrachteten Fall Erdbebenanregung)
Backbone Kurve	Als Backbone Kurve wird für die Beurteilung des Erdbebenverhaltens die einhüllende Kurve der Zyklen mit ansteigender Beanspruchung bezeichnet.
Ballistisches Verbindungsmittel	Ein Verbindungsmittel das im Stahlleichtbau durch schlagartiges Eintreiben eine Platte mit einem kaltgeformten Stahlprofil verbindet.
Beplankung	Wenn ein Plattenwerkstoff durch die Verbindung mit einem Holzrahmen eine Scheibe erzeugt oder als Knickaussteifung der Rippen herangezogen wird, wird dieser als Beplankung bezeichnet.
Brettsperrholz	Mehrere Lagen von Brettern werden zu einer Holzwerkstoffplatte verklebt. Die einzelnen Brettlagen sind orthogonal zueinander angeordnet. Es werden in der Regel Plattendicken von 60 mm bis 240 mm hergestellt.
Bruchverschiebung	Die Bruchverschiebung ist die Verschiebung bei Erreichen des Bruches. Der Bruch ist für jede Art der Versuche definiert. Z. B. bei einem weggesteuerten Versuch durch einen Kraftabfall auf 80 % der zuvor erreichten maximalen Kraft.
Dämpfung	Zur Beschreibung des Abklingverhaltens einer Schwingung wird die Dämpfung verwendet. In dieser Publikation ist dies in der Regel die viskose Dämpfung. Beim Wechsel von kinetischer Energie zu potentieller Energie wird eine dritte Energie abgeführt. Die Ursache hierfür ist Dämpfung.
Duktilität	Als Duktilität wird die Fähigkeit eines Werkstoffes bezeichnet, sich unter Belastung plastisch zu verformen.
Duktilitätsklasse	Möglichkeit der Einteilung von Gebäuden entsprechend ihrer Bauweise in gering, mittel und hoch duktile Bauweisen. Hoch duktile Bauweisen besitzen eine große plastische Tragreserve.
Druckhalbzyklus	Unter Berücksichtigung einer positiv definierten Druckkraft befindet sich der ansteigende Last des Druckhalbzyklus im 1. Quadranten. Einem Druckhalbzyklus folgt ein Zughalbzyklus.
Zyklische Last	Im Rahmen dieser Publikation wird damit eine in min. zwei Richtungen wirkende und richtungswechselnde Last bezeichnet.
Einschlagtiefe	Tiefe mit der das Verbindungsmittel in die zu verbindenden Teile eingetrieben wird.
Energiedissipation	Abgeführte Energie beim Wechsel von kinetischer Energie zu potentieller Energie. Man spricht auch von Zerstreuung der einwirkenden Bewegungsenergie, z.B. durch Reibung in Wärme.
Ermüdungsfestigkeit	beschreibt eine Festigkeit bei der nach einer definierten Anzahl sich wiederholender Beanspruchungen eine Funktionsuntüchtigkeit eintritt.

Fließverschiebung	Die Fließverschiebung definiert den Übergangspunkt von elastischen zu elastisch-plastischen Verschiebungen.
Formänderungsarbeit	Es wird die Arbeit beschrieben, die zur Verformung eines Systems geleistet wird.
Fußrippe	Die Fußrippe ist der konstruktiver Teil der Rippen einer Wand in Holzrahmenbauweise der auf einem Boden oder Fundament gegründet wird.
Gipsfaserplatte	Plattenwerkstoff, der aus Gips und Zellulosefasern besteht und homogen vermischt ist. Die Platte besitzt keine Ummantelung.
Gipskartonbauplatte	Kartonummantelte Platte deren Kern aus Gips besteht. Die Gipskartonbauplatte hat das geringste Leistungsvermögen hinsichtlich der möglichen Anforderungen die an eine Gipskartonplatte gestellt werden können. Heute werden Gipskartonplatten normativ unter dem Begriff Gipsplatten zusammengefasst.
Gipskartonfeuerschutzplatte	Grundlage ist eine Gipskartonbauplatte die durch zusätzliche Glasfasern im Gipskern bei Brandbeanspruchung einen besseren Gefügezusammenhalt besitzt und so den Brandwiderstand verbessert. Die Gipskartonfeuerschutzplatten werden heute ebenfalls unter dem Begriff „Gipsplatte“ normativ zusammengefasst.
Gips-Kernmatrix	Die Gips-Kernmatrix befindet sich bei kartonummantelten Gipsplatten zwischen den beiden äußeren Kartonmanteln. Sie besteht im Wesentlichen aus Gipsbrei und Zuschlagstoffen.
Gipsplatte	Plattenwerkstoff, der im Wesentlichen aus Gips besteht. Dem Gips können Zusatzstoffe hinzugefügt sein. Der Gips kann mit einer Ummantelung versehen sein. Normativ werden nur kartonummantelte Platten als Gipsplatten bezeichnet.
Grundschwingzeit	Aus dem Kehrwert der Eigenfrequenz wird die Grundschwingzeit ermittelt. Es ist die Dauer einer Schwingung. Die Grundschwingzeit wird in der Regel aus der 1. Eigenfrequenz bestimmt.
Holzrahmen	Ein Holzrahmen besteht aus Kanthölzern. Diese sind vertikal und horizontal angeordnet und ergeben aneinandergefügte Rechtecke.
Holztafel	siehe Holzrahmen. Zusätzlich sind die Oberflächen mit Plattenwerkstoffen verschlossen und es ergibt sich eine Wand.
Hüllkurve	Die Hüllkurve ist die einhüllende Kurve der zyklischen Beanspruchung.
Induktiver Wegaufnehmer	Induktive Wegaufnehmer erzeugen eine zur Verformung proportionale Änderung des elektrischen Widerstands.
Kaltgeformte Stahlprofile	Profile aus Stahlblech verschiedener geometrischer Querschnitte die durch Kaltverformung hergestellt werden. Die Blechdicke liegt in der Regel zwischen 0,6 mm und 2,5 mm.
Kaltverfestigung	Die Kaltverfestigung entsteht bei Kaltverformung. Als Kaltverformung werden plastische Deformationen unterhalb der Rekristallisationstemperatur bezeichnet.
Kapazitätsspektrum	Das Kapazitätsspektrum ergibt sich aus der Backbone Kurve (siehe Abschnitt 6.6).
Kardangelenk	Ein Kardangelenk kann keine senkrecht zur Stabachse wirkenden Momente übertragen.
Klammer	Eine Klammer ist ein Befestigungsmittel mit zwei Schäften z. B. zum Befestigen der Beplankung auf der Unterkonstruktion.
Klammergerät	Ein Gerät zum maschinellen eintreiben (nageln) von Klammern z. B. zum Verbinden von Beplankung und Unterkonstruktion.
Kraftabfall	Als Kraftabfall wird der Punkt im Verlauf einer Arbeitslinie bezeichnet, der nach dem Erreichen des Kraftmaximums einem bestimmten Anteil des Kraftmaximums

	entspricht (in der Regel 80% des Kraftmaximums). Mit Erreichen des Kraftabfalls wird in der Regel der Bruchzustand erreicht und der Versuch ist beendet.
Linearführung	Eine Führung die nur eine Translation in einer Richtung zulässt.
Massivholzbau	Bauwerke die mit vollflächig aus Holz zusammengesetzten Bauteilen (z. B. Brettsperrholz) hergestellt werden. Im Gegensatz dazu haben der Fachwerk- und Holzrahmenbau einen inhomogenen Wandaufbau.
Modalform	Zu jede Eigenfrequenz gehört eine Modalform. Die Modalform ist die zur Eigenfrequenz zugehörige Verformungsfigur.
Monotone Last	Als monotone Last wird eine stetig ansteigende Last bezeichnet.
Nichtlinear	Der Zusammenhang zwischen Ereignis und Wirkung ist auf Basis mathematischer Grundlagen nichtlinear. Für Kraft – Verformungs Beziehungen bedeutet dies, dass der E-Modul nicht konstant ist.
Performance Point	Der Performance Point kennzeichnet die beim Erreichen des Versagens vorherrschende Verformung und Beschleunigung in der Kapazitätsbemessung.
Rasterformat	Das Rasterformat im Holztafelbau orientiert sich an den Plattenformaten der Beplankungen. Typische Rasterformate sind 62,5 cm 83,3 cm.
Reaktionskraft	Kraft, die durch Beanspruchung aus einer Verschiebung entsteht.
Rippen	Rippen sind Kanthölzer die zur Herstellung von Holzrahmen verwendet werden.
Scheibe	Ein flächiges Bauteil zur Aufnahme von Schub parallel zu den Rändern der Fläche.
Scherkörper	Als Scherkörper wird ein kleinteiliger Probekörper zur Untersuchung des lokalen Verhaltens einer einschnittigen Verbindung auf Abscheren bezeichnet.
Schwingspiel	Ein Schwingspiel entspricht einem Zyklus
Spektralbeschleunigung	Die Spektralbeschleunigung ist die zur Eigenperiode $T$ des Gebäudes gehörige einwirkende Beschleunigung.
Spektralverschiebung	Verschiebung des Einmassenschwingers die aufgrund der einwirkenden Beschleunigung entsteht
Stahlleichtbau	Konstruktionen aus kaltgeformten Stahlblechen die vergleichbar zu Wandtafeln des Holzbaus konstruiert sind oder als Fachwerke ausgebildet sein können.
Statische Last	Eine Last die in eine Richtung wirkt.
Stiftförmiges Verbindungsmittel	Zylindrisches Bauteil zur Verbindung von Werkstoffen im Holzbau. Stiftförmige Verbindungsmittel sind z. B. Nägel, Schrauben, Stabdübel oder Bolzen.
Translation	Eine Verschiebung aller Punkte in derselben Richtung und um dieselbe Strecke
Überfestigkeitsfaktor	Durch den Überfestigkeitsfaktor wird das tatsächliche Trag-Verhalten von Bauteilen bezogen auf den in der Regel niedrigeren Bemessungswert berücksichtigt.
Unterkonstruktion	Auf einer Unterkonstruktion wird die Platte befestigt. Dabei kann diese z.B. aus einem Stück Holz oder einem kaltgeformten Stahlprofil bestehen.
Verbund-Bauteil	Ein Verbund-Bauteil besteht mindestens aus der Verbindung von zwei vorher getrennt hergestellten Werkstoffen zu einem Querschnitt.
Verhaltensbeiwert	Beiwert zur Berücksichtigung des nichtlinearen Verhaltens eines Bauteils beim Abtrag von Erdbebenlasten.
Versagensverschiebung	siehe Bruchverschiebung.
Verschiebungsamplitude	Die Verschiebungsamplitude ist der Betrag der maximalen und minimalen Verschiebung innerhalb eines Zyklus.
Viskose Dämpfung	siehe Abschnitt 6.5.
Wandkopf	Der obere horizontale Abschluss der Wand wird als Wandkopf bezeichnet.

Wandtafel	Gesamtes Bauteil einer Wand, welches durch den Holzrahmen und die Beplanung auch als Scheibe wirkt. In der Regel beidseitig geschlossenes Element als Fertigteil zur Herstellung von Gebäuden.
Wandscheibe	siehe Holztafel. Zusätzlich verfügt die Wand aufgrund der Verbindung von Plattenwerkstoffen mit den Rippen über eine Scheibenwirkung.
Weggesteuert	Es wird die Art der Versuchsdurchführung bezeichnet. Weggesteuert bedeutet, dass der Probekörper durch eine definierte Verschiebung je Einheit beansprucht wird.
Widerstandskraft	Die Kraft, die einer Beanspruchung entgegenwirkt.
Zellulosefasern	Zellulosefasern werden aus in Mühlen aufgefaserem Altpapier gewonnen und z. B. als Armierung bei der Herstellung von Gipsfaserplatten genutzt.
Zughalbzyklus	siehe Druckhalbzyklus.
Zyklenkollektiv	Ein Zyklenkollektiv besteht in der hier publizierten Untersuchung in der Regel aus drei Zyklen gleicher Amplitude.
Zyklische Last	Eine Last die wiederholt die Richtung wechselt. Die Verschiebungen finden mit geringer Geschwindigkeit statt.
Zyklus	Als Zyklus wird in der hier publizierten Untersuchung der Weg eines Graphen bezeichnet bei dem Start- und Endverschiebung nach Durchlaufen einer positiven, negativen und darauf wieder positiven Verschiebung gleich sind.
2-Raster Wandtafel	siehe Holztafel. Zusätzlich wird die Länge der Wand definiert, die sich an der üblichen Breite der Plattenwerkstoffe orientiert. Ein übliches Rastermaß ist 1,25 m. eine 2-Raster Wandtafel hat eine Länge von 2,50 m.



# Ein Beitrag zum erdbebensicheren Konstruieren mit gipsgebundenen Plattenwerkstoffen im Holzbau

Anwendung von Gipsplatten unter Erdbebenbelastung

Peter Rädcl

## 1 Einleitung

Gebäude bedürfen einer Aussteifung gegen horizontale Lasten. Diese wird im Holzbau unter anderem durch die Ausbildung von Wandscheiben hergestellt. Im hier betrachteten Holzrahmenbau bestehen diese Wandscheiben aus einem Rippenwerk, auf dem Platten befestigt werden. Seit dem Beginn der 1970er Jahre werden in Deutschland Holzhäuser auch mit gipsgebundenen Plattenwerkstoffen ausgesteift. Dazu wird eine Gipsplatte mit stiftförmigen Verbindungsmitteln (Nägeln, Klammern oder Schrauben) auf Holzrahmen befestigt. Das Tragverhalten solcher Wandscheiben wurde in den Anfängen aufgrund von Versuchen im Maßstab 1/1 beurteilt.



Bild 1.1 Versuch an einer Wandscheibe im Maßstab 1/1 mit horizontaler Beanspruchung. Quelle: VHT

Die fortschreitende Entwicklung gipsgebundener Platten in Deutschland brachte ab den 1970er Jahren Gipsfaserplatten als wesentlich robusteres und tragfähigeres Material hervor. Mit diesen Platten ließen sich höhere Tragfähigkeiten bei der Aussteifung erzielen (ab 1982 erste Zulassung). Bei dem Material handelt es sich im Gegensatz zur herkömmlichen „Gipskartonplatte“ im Wesentlichen um ein homogen vermengtes Gemisch aus Zellulosefasern und Gips. Besonders im Bereich der Fertighaus-Industrie ist die Aussteifung von Gebäuden in Holzrahmenbauweise mit Gipsplatten sehr beliebt. Die Platte verhält sich zum einen bei Brandbeanspruchung besser als Holzwerkstoffplatten und ist zum anderen als „Gipskartonplatte“ kostengünstiger als eine Holzwerkstoffplatte. So wird jährlich eine große Zahl an Gebäuden mit einer aussteifend wirksamen Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen hergestellt.

In Deutschland beschränkte sich die Betrachtung der aussteifenden Wirkung zu Beginn auf die statische Beanspruchung der Holzrahmenbauwände. Untersuchungen zum Verhalten unter dynamischen Beanspruchungen in Form von Erdbeben wurden nicht durchgeführt und für Deutschland auch nicht als relevant erachtet. Dynamische Beanspruchungen wie Erdbeben wurden durch statische Ersatzlasten abgebildet. Schäden aufgrund einer fehlerhaften Einschätzung der Anwendung sind nicht bekannt. Für die aussteifende Wirkung der Wandscheibe als statisch beanspruchtes Bauteil wurden die Kenntnisse über das elastische Verhalten als ausreichend betrachtet.

Mit Beginn des 21. Jahrhunderts hat im Zuge der grenzüberschreitenden Anwendung von Bauprodukten im europäischen Wirtschaftsraum die Anwendung in erdbebengefährdeten Gebieten an Bedeutung gewonnen. Gipsgebundene Plattenwerkstoffe kommen auch in Starkbebengebieten wie z.B. in Italien, Griechenland, Spanien, der Türkei und Südfrankreich zum Einsatz.



Bild 1.2      Zerstörtes Gebäude nach dem Loma Prieta Erdbeben 1989 in San Francisco, USA. Quelle: VHT

Übliche Tragwerksplanungen mit aussteifenden Wandscheiben mit Gipsplatten berücksichtigen die Kenntnisse des elastischen Verhaltens, die auch in entsprechenden Normen Eingang gefunden haben. So wird z.B. in Deutschland mit der Einführung von DIN 4149:2005-04 „Bauten in deutschen Erdbebengebieten – Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten“ die Anwendung von Wandscheiben in Erdbebengebieten geregelt. Zukünftig sollen in Deutschland die Regelungen nach DIN EN 1998-1:2010-12 „Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten“ und dem zugehörigen nationalen Anhang Anwendung finden. Besonderes Interesse gilt dabei dem nichtlinearen Verformungsverhalten der Bauteile und Gebäude, da durch nichtlineare Verformungen (Erdbeben -) Energie dissipiert wird. Qualitativ wird das Verformungsverhalten der Bauteile und Gebäude in verschiedene Duktilitätsklassen eingeteilt.

Bei Erdbebenbeanspruchungen wird zwischen linearem (elastischem) Verhalten und nichtlinearem (elastisch-plastischem) Verhalten unterschieden. Zur Beurteilung der vorliegenden Duktilitätsklasse des Tragwerks stellen sowohl

DIN 4149 als auch DIN EN 1998-1 eine Beschreibung von Tragwerksbeispielen des Holzbaus bereit, die eine Zuordnung des Tragwerks zu einer Duktilitätsklasse ermöglichen sollen. Kriterien sind hier die Art der tragenden Bauteile und die Art deren Verbindung sowie die verwendeten Werkstoffe. Für Holzrahmentragwerke werden dort hinsichtlich mittlerer und großer Duktilität uneingeschränkt anwendbare Beplankungswerkstoffe genannt; unter diesen befinden sich momentan keine gipsgebundenen Plattenwerkstoffe. Die Eignung der in oben genannten Normen uneingeschränkt anwendbaren Werkstoffe beruht auf hinreichenden Erkenntnissen aus gebauten Objekten in Erdbebengebieten und hat sich bewährt.

Aufgrund des bisher nur bekannten und erfassten linearen Verhaltens von Holzrahmenbauwänden mit einer Beplankung aus Gipsplatten kann mit ihnen auch nur rein elastisch bemessen werden. Dies hat zur Folge, dass im Vergleich zu Konstruktionen mit konkurrierenden Plattenwerkstoffen deren bekanntes duktiles Verhalten zu großen Vorteilen bei der Beurteilung des Tragverhaltens unter Erdbebenbeanspruchung führt.

Die Unkenntnis über das duktile Verhalten und normative Einschränkungen werden dem vorhandenen nicht nur ausschließlich mechanischen Leistungspotenzial der gipsgebundenen Plattenwerkstoffe nicht gerecht. Beispielhaft zu nennen sind brandschutztechnisch notwendige Konstruktionen mit Beplankungen aus Plattenwerkstoffen auf Gipsbasis. Die aussteifende Wirkung der Holzrahmenbauwand wäre nur in Kombination mit duktilen Werkstoffen möglich. Dies führt zu einem höheren Aufwand bei der Herstellung solcher Konstruktionen in erdbebengefährdeten Gebieten. Die Folge sind größere Kosten und ein größerer Verbrauch an Ressourcen. Dies hat zur Folge, dass eine Anwendung von gipsgebundenen Plattenwerkstoffen in Gebieten mit großen Erdbebenkräften aktuell ausgeschlossen ist. In Gebieten mit großen Erdbebenkräften ist eine duktile Bemessung der Gebäudeaussteifung unverzichtbar. Ohne duktiles Bauteilverhalten sind die Einwirkungen aus starken Erdbeben größer als der rechnerische elastische Tragwiderstand der mit gipsgebundenen Platten beplankten Holzrahmenbauwand, obwohl anzunehmen ist, dass auch aufgrund der fortschreitenden Entwicklung der gipsgebundenen Plattenwerkstoffe mit ihnen ein duktiles Verhalten erzielt werden kann.

Um dieser Unkenntnis entgegenzutreten werden in dieser Arbeit Untersuchungen zum duktilen Tragverhalten der horizontalen Aussteifung von Holzrahmenbauten durch Wandscheiben mit Beplankung aus verschiedenen gipsgebundenen Plattenwerkstoffen durchgeführt und Schlussfolgerungen gezogen. Es wird damit die Berücksichtigung postelastischen Verhaltens und dissipativer Effekte der mit gipsgebundenen Platten beplankten Holzrahmenbauwand ermöglicht.





## 2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Beurteilung des horizontalen Tragwiderstands und der Duktilität von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus verschiedenen Typen von gipsgebundenen Plattenwerkstoffen unter Erdbebenbeanspruchung. Dazu soll die nichtlineare Scheibentragfähigkeit beurteilt werden. Kennwerte zum duktilen Verhalten unter zyklischer Beanspruchung (wie bei Erdbeben) sollen aus Versuchen an kleinteiligen Proben, die die Verbindung abbilden, und Wandscheiben in realer Größe, die das Bauteil abbilden, bestimmt werden. Dabei soll auch die Untersuchungs- und Bewertungsmethode der Versuche betrachtet und ggf. aufgrund erster Erkenntnisse angepasst werden.

Kleinteilige Versuche an der Verbindung werden durchgeführt, um das Verhalten der Verbindung genauer zu beschreiben und eine Modellbildung zu ermöglichen. Bei den verschiedenen Typen von Plattenwerkstoffen handelt es sich um Gipsplatten nach DIN EN 520:2009-12 „Gipsplatten - Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren“ und um Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2:2009-12 „Faserverstärkte Gipsplatten - Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren - Teil 2: Gipsfaserplatten“ verschiedener Hersteller. Die Werkstoffe werden in Abschnitt 5.2 näher betrachtet.



Bild 2.1 Aufbau eines Versuchs an einem Scherkörper. Quelle: VHT



Bild 2.2 Aufbau eines Versuchs an einer Wandscheibe. Quelle: VHT

Grundsätzlich ist die Frage zu beantworten, ob ein duktileres Verhalten der Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Gipsplatten zu beobachten ist und wodurch dieses entsteht. Dabei sollen die verschiedenen Parameter, die zu duktilem Verhalten führen, identifiziert und betrachtet werden.

Ziel ist weiterhin die ingenieurmäßige Beschreibung von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankungen aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen, die es ermöglicht, die Tragfähigkeit unter Erdbebenbeanspruchung zu beurteilen und zu bewerten. Dazu soll ein Nachweismodell erarbeitet werden, das den Abtrag von Erdbebenbeanspruchungen durch Wandscheiben mit Beplankungen aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen abbildet.

Es soll eine Methode zur Deklaration von Rechenwerten für den Erdbebennachweis (Verhaltensbeiwert  $\eta$  und Überfestigkeitsfaktor  $\alpha_0$ ) im Kontext der Bemessungsnormen DIN EN 1995-1-1:2010-12 „Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau“ und DIN EN 1995-

1-1/NA:2013-08 „Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau“ entwickelt werden. Gemäß dieser Methode sollen Verhaltensbeiwerte und Überfestigkeitsfaktoren für die Bemessung empfohlen werden, um duktilen Verhalten von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus gipsgebundenen Platten berücksichtigen zu können.

Darüber hinaus soll eine Methode ausgearbeitet werden, die es ermöglicht, mit Hilfe von kleinteiligen Versuchen die Eignung von Plattenwerkstoffen und Verbindungsmitteln, besonders deren Kombination, hinsichtlich der Eignung unter Erdbeben einzuschätzen. So wird ermöglicht, bereits im Vorfeld von Untersuchungen Kombinationen von Plattenwerkstoffen und Verbindungsmitteln mit hohen dissipativen Eigenschaften zu wählen.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen durch vergleichende Untersuchungen an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit bekannt gutem Verhalten unter Erdbebenbeanspruchung validiert werden. Dies soll auch die Vergleichbarkeit der Eigenschaften verschiedener Wandaufbauten unter Erdbebenbeanspruchung ermöglichen.

### 3 Gliederung der Arbeit

Die hier vorliegende Arbeit gliedert sich dabei in 4 wesentliche Bereiche, deren Themen nachfolgend kurz zusammengefasst werden.

Der Einleitung (Abschnitt 1) und Zielsetzung (Abschnitt 2) der Arbeit folgt eine Beschreibung des Stands der Forschung und der Normung (Abschnitt 4). Dabei werden aktuelle und vorhergehende Untersuchungen sowie normativ festgeschriebene Prüfverfahren, die einen inhaltlichen Bezug zu den Untersuchungen haben kurz genannt und der für diese Arbeit wesentliche Bezug hergestellt. Nachfolgend werden die für die hier vorliegende Publikation gewählten Untersuchungsmethoden an Scherkörpern und Wandscheiben vorgestellt und hinsichtlich der Grundlagen und dem Versuchsumfang betrachtet (Abschnitt 5).

Im Weiteren werden auf Basis erster Versuchsergebnisse Überlegungen zur Modifikation der Untersuchungs- und Bewertungsmethoden angestellt und die umgesetzten Modifikationen begründet (Abschnitt 6). Dabei werden das Aufbringen einer Auflast, die Bestimmung der Fließverschiebung und der Duktilität, die Definition des Endes eines Versuches, die Methode zur Bestimmung der Energiedissipation und der Dämpfung sowie die Kapazitätsspektrum-Methode betrachtet.

Im Anschluss an die Modifikation der Methoden werden die Ergebnisse der Versuche zusammengefasst (Abschnitt 7). Dabei wird das lokale Verhalten der untersuchten einschnittigen Verbindung unter zyklischer Beanspruchung beschrieben und charakterisiert. Es werden Schädigungsparameter der Scherkörper bestimmt und einem selbst entwickelten Modell zugrunde gelegt (Abschnitt 8). Zur Beurteilung von gesamten Bauteilen wird das globale Verhalten unter zyklischer Beanspruchung der untersuchten Wandscheiben betrachtet und Versagensformen beschrieben (Abschnitt 9).

Aufgrund der in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse wird ein Bemessungskonzept vorgeschlagen und ein Weg zur Eingliederung der Untersuchungsergebnisse in dieses entwickelt (Abschnitt 10 und Abschnitt 11). Um die Qualität der Ergebnisse bewerten zu können, werden die Untersuchungsergebnisse in Referenz zu uneingeschränkt anwendbaren Plattenwerkstoffen betrachtet (Abschnitt 12). Ein Vergleich mit diesen findet statt (Abschnitt 13). Es folgen die Nennung der Grenzen und Randbedingungen für die Erkenntnisse dieser Untersuchung und Empfehlungen für die Bemessung zu Verhaltensbeurteilen, Überfestigkeitsfaktoren sowie Konstruktions- und Bemessungsregeln gegeben (Abschnitt 14).

Abschließend werden die wesentlichen Inhalte zusammengefasst und ein Fazit gezogen. Aus den Erkenntnissen dieser Publikation folgt ein Ausblick auf weitere mögliche Fragestellungen im Zusammenhang des erdbebensicheren Konstruierens mit gipsgebundenen Platten als Beplankung von Wandscheiben im Holzrahmenbau (Abschnitt 15).





## 4 Stand der Forschung und Normung

### 4.1 Stand der Forschung

Es existieren umfangreiche Untersuchungen zum Verhalten verschiedener Bauweisen und Baustoffe unter Erdbebenbeanspruchung; diese sind meist Untersuchungen aus Ländern mit ausgeprägt hohen Erdbebenbeanspruchungen. In Deutschland wurden experimentelle Untersuchungen an gipsgebundenen Plattenwerkstoffen vor diesem Hintergrund erst nach der Einführung von DIN EN 1998-1 durchgeführt. Dabei wird dem nichtlinearen Verhalten besonderes Interesse gewidmet. Ziel ist dabei immer ein ausgeprägt duktiler und unter zyklischer Beanspruchung besonders dissipativer Verhalten vorzufinden. Das Vorgehen bei solchen Untersuchungen unterteilt sich in die Untersuchung gesamter Gebäude und Bauteile sowie die Untersuchung einzelner Tragwerksteile, wie z.B. Verbindungen. Nachfolgend wird ein Überblick über durchgeführte Untersuchungen gegeben und es werden Bezugspunkte zu dieser Arbeit herausgestellt.

Umfangreiche Untersuchungen zum linearen Verhalten von Gipsplatten wurden von Tichelmann [11] durchgeführt. Die Untersuchungen lieferten erstmals mechanische Kennwerte für die statische Anwendung von Gipsplatten sowie Zusammenhänge zwischen diesen Kennwerten und Parametern zur Herstellung von Gipsplatten, wie z.B. die Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit von der Rohdichte. Es konnte aber auch eine starke Abhängigkeit der Festigkeiten und E-Module von der Orientierung der resultierenden Spannungsrichtung zur Herstellungsrichtung festgestellt werden. Diese Abhängigkeit wurde auf die Orthotropie des Deckkartons von Gipskartonplatten bzw. der Ausrichtung der Zellulosefasern beim Produktionsprozess von Gipsfaserplatten zurückgeführt. Weitere Unterschiede konnten zwischen normalen „GKB“ (Gipskartonbauplatten) und „GKF“ (Gipskartonfeuerschutzplatten) aufgrund der Zugabe von Glasfasern festgestellt werden. Untersuchungen mit zyklischer Beanspruchung wurden nicht durchgeführt. Erkenntnisse zu daraus resultierenden Eigenschaften (Dämpfung, Duktilität, Energiedissipation) sollen durch die hier verfasste Publikation gewonnen werden.

An der TU Darmstadt wurden am Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik im Fachgebiet Holzbau in den Jahren 1992 bis 1995 verschiedene Publikationen veröffentlicht [27, 28, 29, 30]. Ziel dieser Publikationen war die Aufnahme von Eigenschaften für Verbindungen und Tragwerke des Holzbaus in den Eurocode 8 zur Beschreibung des duktilen Verhaltens. Den Publikationen sind sowohl Untersuchungen mittels eigener Versuche als auch die Auswertung nationaler und internationaler Publikationen zugrunde gelegt. An der TU Darmstadt wurden dazu Versuche an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise sowie an Deckenscheiben von Holzbalkendecken durchgeführt. Auf die Probekörper wurde eine zyklische weggesteuerte Deformation aufgebracht. Es wurden unter anderem die Dämpfung, die Reduzierung der mechanischen Eigenschaften und die Energiedissipation untersucht. Die Wandscheiben in Holzrahmenbauweise verfügten über eine Beplankung mit Flachpressplatten der Nenndicke 13,0 mm. Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen wurden nicht untersucht. Ebenso wurden Versuche an Deckenscheiben nur mit aussteifender Beplankung aus Spanplatten durchgeführt. Neben den Versuchen an Bauteilen im Labor wurde auch ein gesamtes Gebäude hinsichtlich seiner Eigenwerte und Steifigkeiten untersucht. Diese Arbeiten bieten für die hier vorliegende Publikation eine gute Grundlage. Erkenntnisse dieser Publikationen zum Verhalten von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise und Deckenscheiben von Holzbalkendecken mit einer Beplankung aus Flachpressplatten bzw. Spanplatten (beide Begriffe bezeichnen das gleiche Produkt) können mit in dieser Publikation gewonnenen Erkenntnissen abgeglichen werden. Ein Zusammenhang zur Johansen-Theorie wird in diesen Publikationen jedoch nicht hergestellt. Lediglich die Relevanz der Ausbildung von Fließgelenken wurde erkannt. Es wurden auch keine gipsgebundenen Plattenwerkstoffe hinsichtlich ihres Verhaltens untersucht. Es wurde in [29] gar festgestellt, dass von Gipsfaserplatten die gleichen Eigenschaften zu erwarten sind wie von Gipskartonplatten, die aufgrund der geringen Oberflächenfestigkeiten keine Doppelbiegung (Ausbildung von 2 Fließgelenken) in den Verbindungsmitteln ermöglichen. Diese Aussage soll im Rahmen dieser Publikation widerlegt werden und es soll gezeigt werden,

dass eine Ausbildung von 2 Fließgelenken an einer einschnittigen Verbindung von Gipsfaserplatte und Holzunterkonstruktion möglich ist.

Wandtafelkonstruktionen mit einer Beplankung aus Holzwerkstoffen (z.B. OSB) und Gipsplatten (z.B. Gipsfaser) werden ebenfalls im Bereich des Stahlleichtbaus eingesetzt. Hier werden die im Holzbau verwendeten Rippen aus Holz durch Rippen aus kaltgeformten Stahlprofilen ersetzt. Die Verbindung von Beplankung und Rippen erfolgt mit Schrauben oder ballistischen Verbindungsmitteln (siehe hierzu die Publikation von Pfau [20]). In der Anwendung werden Tragfähigkeiten in Tabellenform für verschiedene Wandtypen angegeben. Die Veröffentlichung von Pfau[20] enthält ein Bemessungskonzept für die statische Beanspruchung von Wandscheiben im Kontext europäischer Bemessungsvorgaben (vgl. DIN EN 1995-1-1). Untersuchungen von Lange und Naujoks [21], veröffentlicht im Jahr 2007, betrachteten das Verhalten von Wandscheiben unter horizontaler und vertikaler Beanspruchung. Dabei wurden neben Spanplatten, Faserzementplatten und Trapezprofilen auch Gipsfaserplatten als Beplankung verwendet. Es wurden sowohl Wandscheiben als auch Scherkörper untersucht. Die Wandscheiben wurden statisch bis zum Bruch untersucht. Eine zyklische Beanspruchung wurde im Gegensatz zu den in der hier vorliegenden Publikation beschriebenen Untersuchungen nicht aufgebracht. Das Verhalten der Beplankung von Wandscheiben mit Rippen aus kaltgeformten Stahlprofilen ist vergleichbar dem Verhalten der Beplankung von Wandscheiben mit Holzrippen. Um Verbindungsmittel zum Fließen (duktilen Verhalten) zu bringen, ist es erforderlich, dass die Verbindungsmittel eingespannt werden. Eine Einspannung im Stahlprofil ist im Gegensatz zum Vollquerschnitt der Holzrippe durch die geringe Blechdicke nur in geringem Maße möglich. Es ist daher zu erwarten, dass einschnittige Verbindungen von Platten und Holzunterkonstruktion eine höhere Duktilität erzielen.

Weitere Untersuchungen an Stahlleichtbaukonstruktionen mit aussteifenden Sandwich-Elementen wurden von De Matteis und Landolfo [22] 1999 veröffentlicht. In den Untersuchungen wurden die Verbindungen der Sandwichelemente in der Längsfuge sowohl statisch als auch zyklisch beansprucht. Die zyklische Beanspruchung diente dem Ziel der Bestimmung der dissipativen Eigenschaften der Scheiben und einer mathematischen Modellierung des Verhaltens. In den Untersuchungen wurden genaue Betrachtungen der Verbindung angestellt und es wurde festgestellt, dass dem Verbindungsmittel eine zentrale Bedeutung hinsichtlich des dissipativen Verhaltens zukommt. Spröde versagende Verbindungsmittel wie z.B. Niete sind, falls ein duktilen Verhalten gewünscht ist, nicht zu empfehlen. Dies lässt sich auch auf die Wahl von Verbindungsmitteln für diese Untersuchung übertragen. Um ein möglichst duktilen Verhalten zu erzielen, sollte auch das Verbindungsmittel selbst möglichst duktil sein. Diese Untersuchungen stützen die Annahmen und Aussagen der hier Vorliegenden Arbeit hinsichtlich der Wahl der Verbindungsmittel; beschäftigen sich aber nicht mit Wandscheiben in Holzrahmenbauweisen und deren Befestigung der Beplankung.

Zur Untersuchung des Tragverhaltens unter Erdbebenbeanspruchung sind in den USA, Japan und Italien Methoden verbreitet, die sich der Untersuchung gesamter Gebäude bedienen. Die Gebäude entsprechen dabei einem bestimmten Gebäudetyp, der sich durch die verwendeten Materialien, die Konstruktion und die Geometrie definiert. Gebäude mit aussteifenden Scheiben aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen werden dabei in der Regel den Holzbauten zugeordnet. Aus Italien ist aus dem Bereich Holzbau das Forschungsprojekt Sofie2 [4] zu nennen, bei dem ein Gebäude in Brettsperrholzbauweise mit sieben Geschossen untersucht wurde. - Im Vergleich zu beplankten Holzrahmenkonstruktionen ist die Brettsperrholzbauweise sehr steif und weniger duktil -. Die Untersuchungen fanden in Japan im National Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) in Miki bei Kobe statt. Dort verfügt man über einen Erdbebentisch auf dem gesamte mehrstöckige Gebäude aufgestellt werden können. Die Konstruktion des Tisches ermöglicht eine 3-dimensionale Anregung, bei der der Tisch auch gekippt werden kann. Eine Untersuchung gesamter Gebäude ist in Deutschland nicht üblich und wird durch rechnerische Modelle ersetzt. Ziel der hier vorliegenden Arbeit ist die Bereitstellung von Kennwerten für die rechnerischen Modelle und nicht die Beschränkung auf definierte Konstruktionen und Geometrien.

Eigenschaften von Holzrahmenkonstruktionen mit Beplankungen aus Gipsplatten, wie sie in Japan Verwendung finden werden von Yasumura [19] genannt. Dabei wird nicht zwischen unterschiedlichen Arten von gipsgebundenen Platten (kartonummantelt, Gipsfaser, etc.) unterschieden. Über den Verbindungsmitteltyp werden keine Aussagen getroffen. Den unterschiedlichen Beplankungsmaterialien werden Wandkoeffizienten zugewiesen. Diese werden in japanischen Bemessungsregeln für Erdbebenbeanspruchungen vorgegeben. Die Eigenschaften werden aufgrund von Untersuchungen an vollständigen Gebäuden bestimmt und sind für europäische Bemessungsverfahren nur bedingt geeignet. Die in Deutschland übliche Konstruktionsmethode kombiniert Kanthölzer mit einer Beplankung, die mittels eines Verbindungsmittels auf den Kanthölzern befestigt wird. Alle drei Bestandteile können in Geometrie und mechanischer Qualität variiert werden und sind individuell zu bemessen. Eine schlichte Übernahme der Ergebnisse wäre daher nicht zielführend.

Von Memari und Solnosky [23] wurden 2014 Untersuchungen an Wandscheiben mit einer Beplankung aus Gipsplatten veröffentlicht. Dabei wurden verschiedene Wände mit unterschiedlichen Lastprotokollen zyklisch beansprucht. Für die Untersuchungen wurden zur Herstellung der Wandscheiben Nägel und Schrauben verwendet. Als kleinster Durchmesser der Nägel wurde ein Durchmesser von 3,7 mm untersucht. Da das dissipative Verhalten der Bauteile stark vom Verhalten der einzelnen Verbindung abhängt und hier ein vergleichsweise steifes und sprödes Verbindungsmittel verwendet wurde ist anzunehmen, dass kein ausgeprägt dissipatives Verhalten erreicht werden konnte bzw. mit einer alternativen Wahl von in Deutschland gebräuchlichen Verbindungsmitteln ein gutmütigeres Verhalten erreicht werden kann. Diese Frage wird im weiteren Verlauf der Arbeit in Abschnitt 7.3 betrachtet; daher wird an dieser Stelle eine ausführliche Diskussion nicht geführt. Es wurden verhältnismäßig große Abstände der Verbindungsmittel gewählt. Das dokumentierte Versagen zeigt überwiegend Ausreisen der Verbindungsmittel aus der Platte bzw. lokales Versagen der Platte im Bereich der Verbindung. Durch die gewählte Konstruktion konnte kein duktileres Verhalten erreicht werden, da die Verbindungsmittel nicht ausreichend fließen.

In den Vereinigten Staaten von Amerika wurden von 1988 bis 2016 innerhalb des CUREE (Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering) umfangreiche Untersuchungen zu Holzbauten unter Erdbebenbeanspruchung durchgeführt. Dabei wurden auch vollständige Wände mit einer Beplankung aus Gipsplatten unter zyklischer Beanspruchung untersucht. Die äußere Bekleidung der Wand bestand dabei aus einer Putzschicht, die auf ein grobmaschiges Gittergewebe aus Draht aufgebracht wurde. Innenseitig wurde eine Gipskartonplatte auf den Rippen befestigt. Es wurden für den nordamerikanischen Raum typische Holzquerschnitte verwendet. Die Wände wurden als Ganzes bewertet (Arnold, Uang, Filiatrault [33, 34]).

Mc Mullin und Merrick [35] führten Versuche an beidseitig mit Gipskartonplatten beplankten Wänden durch. Als Verbindungsmittel wurden Schrauben und Nägel mit großem Durchmesser verwendet. Ebenso wie bei den Versuchen von Arnold, Uang, Filiatrault hatten die Wände horizontale Stöße auf halber Wandhöhe. Zu den Untersuchungen von Mc Mullin und Merrick wurde von Deierlein und Kanvinde [37] ein analytisches FE-Modell entwickelt.

Fonseca, Rose, Sterling, Campbell [36] haben Verbindungen von OSB und Holz-Unterkonstruktion untersucht. Dabei wurden Nägel, Schrauben und Klammern betrachtet. Die Versuche wurden sowohl parallel als auch senkrecht zur Holzfaser an üblichen Rippenquerschnitten durchgeführt. Es wurden Fließmomente bestimmt und ein Modell der Verbindung entwickelt, welches den Versuchsergebnissen gegenüber gestellt wurde.

Alle hier genannten Untersuchungen im Rahmen des CUREE-Programms befassten sich mit Wänden mit einer Beplankung aus Gipskartonplatten. Gipsfaserplatten wurden nicht betrachtet. Die Beplankung der Wände wurde horizontal gestoßen. Dies ist für Deutschland untypisch und führt zu einer größeren Duktilität der Wände. Für in Deutschland typische Wände kann dies zu einer Überschätzung des duktilen Tragverhaltens führen. Teilweise wurden Wände mit einer auf der Außenseite liegenden in ein Drahtgewebe eingebundenen Putzschicht untersucht. Eine Aussage über die

Gipskartonplatte alleine ist hier nicht ableitbar. Lokale Untersuchungen an Verbindungen wurden nur mit Holzwerkstoffplatten des Typs OSB durchgeführt. Die untersuchten Werkstoffe, Querschnitte und Konstruktionsarten entsprechen nicht der gängigen Praxis in Deutschland. Die Aussagen über das Verhalten unter Erdbebenbeanspruchung sind daher nicht übertragbar.

Neben den durchgeführten Untersuchungen wurden Festlegungen für die Durchführung von zyklischen Versuchen getroffen und Empfehlungen ausgesprochen, um die Anwendungseignung von Holzrahmenkonstruktionen zu beurteilen [38]. Der Ablauf der zyklischen Versuche soll durch monotone Vorversuche bestimmt werden. Als Versagenskriterium wird ein Kraftabfall auf 80 % der in den zyklischen Versuchen erreichten maximalen Last empfohlen. Anhand der dabei erreichten Verschiebung werden die Amplituden der Verschiebung definiert. Diese Aussagen bieten eine gute Basis für die Durchführung eigener Versuche und decken sich grundsätzlich mit dem hier gewählten Vorgehen.

In Deutschland durchgeführte Untersuchungen an Wandscheiben unter zyklischer Beanspruchung beschränken sich auf die Untersuchung von Beplankungen aus Holzwerkstoffplatten und Brettsperrholzkonstruktionen. Diese wurden im Verbund mit europäischen Partnern im Projekt „Optimber Quake“ [3] durchgeführt. Zur Beurteilung von ganzen Gebäuden wurden Ergebnisse aus kleinteiligen Versuchen an Verbindungen und einzelnen Bauteilen in die Modellierung numerischer Modelle integriert. Abschließend erfolgte eine Bewertung hinsichtlich ihrer Eigenschaften zur Anwendung unter Erdbebenbeanspruchungen. Vergleichende Untersuchungen mit verschiedenen gipsgebundenen Plattenwerkstoffen wurden nicht durchgeführt. Eine umfassende Beurteilung des Verhaltens von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus gipsgebundenen Platten wird in [3] nicht vorgenommen.

Neben den gebräuchlichen Bauweisen (Holzrahmenbau und Massivholzbau) im Holzbau wurde am Karlsruher Institut für Technologie eine Untersuchung des Erdbebenverhaltens von kleinteiligen Bauteilen (Elemente die ähnlich dem Mauerwerk zusammengefügt werden und an den Fugen schubfest miteinander verbunden werden; die Kammern der Elemente werden abschließend mit einer Schüttung gefüllt) zur Erstellung von Gebäuden in Holzbauweise durchgeführt. Die Ergebnisse zu den Untersuchungen sind der Veröffentlichung „Innovative Wandbausysteme aus Holz unter Erdbebeneinwirkungen“ [10] zu entnehmen. Ziel dieser beiden Untersuchungen war die Bestimmung von Verhaltensbeiwerten und Überfestigkeitsfaktoren. Die in dieser Publikation betrachteten Bauteile bestehen nicht aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen und liefern daher nur Erkenntnisse zum grundsätzlichen Vorgehen. Eine Übertragbarkeit des Vorgehens für diese Bauweise auf andere Bauweisen wie Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen bleibt fraglich.

Unabhängig von den Bauweisen und Baustoffen konnte festgestellt werden, dass überwiegend Untersuchungen zyklischer Art zur Betrachtung des Verhaltens unter Erdbebenbeanspruchung an Bauteilen und Verbindungen durchgeführt wurden. So wurden auch zur Beurteilung von Mauerwerksbauten Wandscheiben hinsichtlich des nichtlinearen Tragverhaltens an der TU München von Zilch, Grabowski und Scheufler [5] untersucht. Es wurde eine statisch-zyklische Beanspruchung in Form einer Verschiebung am Wandkopf in die real großen Probekörper eingeleitet. Kleinteilige Untersuchungen wurden hierbei nicht durchgeführt. Die zyklische Beanspruchung wurde mit sehr geringer Verschiebungsgeschwindigkeit aufgebracht.

Auch die in der hier vorliegenden Publikation beschriebenen Versuche wurden mit einer statisch zyklischen Beanspruchung durchgeführt. Damit findet eine Angliederung an eine baustoffübergreifende Versuchsmethodik statt, die zur Untersuchung zyklischen Verhaltens Anwendung findet.

Neben den Untersuchungen an der Bauweise wurden auch Betrachtungen zur Bewertung des Verhaltens unter Erdbebenbeanspruchung durchgeführt. Hier sind Untersuchungen und Vorgehensweisen hinsichtlich der Berücksichtigung nichtlinearen Bauteilverhaltens von Bachmann „Erdbebensicherung von Bauwerken“ [1] veröffentlicht worden. Dort werden zwei Ansätze zur Abminderung der Reaktionskraft bei Berücksichtigung nichtlinearen (elastisch-plastischem)

Verhaltens beschrieben. Diese werden in Abschnitt 10.2. zur Eingliederung der Ergebnisse in das Bemessungskonzept näher betrachtet. Es wird der Ansatz gleicher Verschiebungen und der Ansatz gleicher Arbeit vorgestellt. Für beide Ansätze werden Empfehlungen zur Anwendung in Abhängigkeit von den Frequenzen der Einwirkung gegeben. Der Ansatz gleicher Verschiebungen wird für niedrige Frequenzen  $< 1,5$  Hz empfohlen. Für den Bereich von ca. 2 Hz bis 10 Hz wird der Ansatz gleicher Arbeit empfohlen. Die Empfehlung der Anwendung des Ansatzes gleicher Verschiebungen zur Beurteilung nichtlinearen Verhaltens für niedrige Frequenzen wird auch von Chopra „Dynamics of structures“ [8] gegeben. Diese Ansätze können auch für die hier betrachtete Fragestellung hilfreiche Erkenntnisse bringen und sollen bei der Klärung der Fragestellung helfen, ebenso wie das von Meskouris und Hinzen in der Veröffentlichung „Bauwerke und Erdbeben“ [7] beschriebene Nachweisverfahren nach der Kapazitätsspektrum-Methode. In Abschnitt 11 wird mittels der Grundlagen der Kapazitätsspektrum-Methode eine Bewertung der duktilen Eigenschaften vorgenommen. Sie stellt die Kapazität eines Bauwerks den Anforderungen aus seismischer Beanspruchung gegenüber. Die Verläufe der Kapazität und der Belastung werden in einem Spektralbeschleunigungs-Spektralverschiebungs-Diagramm aufgetragen. Aus dem Schnittpunkt beider Verläufe ergibt sich der „Performance Point“. Er gibt die bei einem Bemessungsbeben zu erwartenden Verschiebungen und Beschleunigungen an. Die Kapazität der Wandscheiben wird als Kapazitätskurve aus Versuchen oder Modellen gewonnen. Das Verfahren verweist auf ATC-40. ATC-40 ist eine Bemessungsvorgabe der Seismic Safety Commission des State of California. In der hier verfassten Publikation wird die Kapazität aus den durchgeführten Versuchen gewonnen. Beide Verfahren werden zur Klärung der Fragestellung dieser Publikation Anwendung finden.

Eine Publikation zur Planung von Konstruktionen mit gipsgebundenen Platten im Bereich des nichttragenden Trockenbaus wurde von der Knauf Gips KG in 2008 veröffentlicht [24]. Enthalten sind Anschlussdetails von Trockenbaukonstruktionen für den Erdbebenfall und eine Betrachtung des Vorteils der Reduzierung der Masse durch Trockenbaukonstruktionen in Gebäuden im Erdbebenfall. Es werden keine Eigenschaften tragender Bauteile betrachtet.

Zur Eignung mit gipsgebundenen Plattenwerkstoffen beplankter Wandscheiben lagen bisher keine ausreichenden Kenntnisse vor. Dies beinhaltet insbesondere Kenntnisse über das nichtlineare Verhalten unter wiederholter Deformation über den Bereich linearen Verhaltens hinaus. Aussagen zur Energiedissipation, der Dämpfung und der Überfestigkeit können nicht getroffen werden. Diese Kennwerte sind nicht ermittelt worden und es ist unklar, welche Untersuchungsmethoden zur Ermittlung Anwendung finden können. Hinsichtlich der Untersuchungsmethoden ist zudem nicht geklärt, ob die bekannten Methoden für die Untersuchung von Gipswerkstoffen weiterentwickelt werden müssen oder in Gänze neu zu erstellen sind. Zu gipsgebundenen Plattenwerkstoffen sind derzeit keine weiteren Untersuchungen bekannt, die gleichwertig zu den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen sind.

Die internationalen Untersuchungen im Bereich der Aussteifung von Gebäuden mit gipsgebundenen Werkstoffen konzentrierten sich überwiegend auf Untersuchungen an vollständigen Gebäuden und die Bestimmung der Kennwerte für das Verhalten unter Erdbeben aus diesen Untersuchungen. Ebenso findet die Möglichkeit der Verwendung verschiedener Verbindungsmittel keine wesentliche Beachtung. Auf die Eignung verschiedener Verbindungsmittel wird nicht eingegangen. Eine Untersuchung verschiedener Einflussparameter auf die dissipativen Eigenschaften einschnittiger Verbindungen und Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen hat bisher nicht stattgefunden. Dazu zählt auch, dass die Johansen-Theorie bisher in diesen Kontext nicht eingebunden wurde.

## 4.2 Stand der Normung

Eine Beurteilung der Tragfähigkeit von gipsgebundenen Werkstoffen als aussteifende Beplankung unter Erdbebenbeanspruchung erfolgt in Deutschland auf Basis von DIN 4149 aufgrund elastischen Verhaltens. Die mit Gipsplatten

beplankten Wände werden dabei dem Holzbau zugeordnet. Es werden mechanische Eigenschaften aufgrund monotoner Prüfungen berücksichtigt. Dieses Vorgehen ermöglicht keine Berücksichtigung des nichtlinearen Tragverhaltens unter Erdbebenbelastung. Auf europäischer Ebene findet DIN EN 1998-1 Anwendung. Hier kann ein Nachweis der Eignung der Beplankung in Kombination mit dem Verbindungsmittel und der Unterkonstruktion nach DIN EN 12512:2005-12 „Holzbauwerke – Prüfverfahren – Zyklische Prüfungen von Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln“ zum nichtlinearen Verhalten erbracht werden.

Die Tragwerksplanung für Bauteile mit tragenden gipsgebundenen Plattenwerkstoffen erfolgt nach DIN EN 1995-1-1. Dabei sind die Kennwerte für Gipsplatten nach DIN EN 520 und DIN 18180:2014-09 „Gipsplatten - Arten und Anforderungen“ im nationalen Anhang (DIN EN 1995-1-1/NA) geregelt. Ebenso sind die Bemessungsregeln analog derer für Holzwerkstoffplatten anzuwenden. Kennwerte für die Ermüdungsfestigkeit, wie sie aus dem Stahlbau bekannt sind, liegen für Verbindungen und Bauteile aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen nicht vor. Einer Beurteilung dienlich könnten Erkenntnisse ähnlich den Wöhler-Linien für Stahlbauteile sein.

Das Verfahren zur Beurteilung einer Lasteinwirkungsdauer beruht auf Untersuchungen zum Tragverhalten unter dauerhaft gleich gerichteter Beanspruchung nach DIN EN 1156:2013-10 „Holzwerkstoffe - Bestimmung von Zeitstandfestigkeit und Kriechzahl“ einer Probe (in der Regel sind dies Biegeproben) mit einer konstanten Last. Eine Untersuchung des Tragverhaltens nach Beaufschlagung mit Schwingspielen ist nicht vorgesehen.

Auf europäischer Ebene wird im Bereich des Holzbaus auf DIN EN 12512 verwiesen. Dabei wird eine zyklische Beanspruchung mit zunehmenden Verschiebungsamplituden als Beanspruchung am Probekörper aufgebracht. DIN EN 12512 ist primär für die Untersuchung kleinteiliger Probekörper vorgesehen. Eine Anwendung an gesamten Bauteilen ist aber nicht ausgeschlossen. Neben DIN EN 12512 findet ISO 16670:2003-12 „Timber structures – Joints made with mechanical fasteners – Quasi-static reversed-cyclic test method“ Anwendung. Nach beiden technischen Regeln wird eine zyklische Beanspruchung in Form einer Verschiebung mit zunehmenden Amplituden auf den Probekörper aufgebracht. Die Größe der Amplituden bestimmt sich nach der festgestellten Fließverschiebung  $v_y$  gemäß DIN EN 12512. Nach ISO 16670 werden die Amplituden auf Basis der Bruch- oder Versagensverschiebung  $v_u$  bestimmt.

Neben den europäischen Regelungen gibt es in den USA zu verschiedenen Konstruktionsarten von Wänden Angaben zum Verlauf der oberen Hüllkurve (Backbone – Kurve). Diese können der technischen Regel FEMA 273/October 1997 „NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings“ entnommen werden. Darin werden eine Vielzahl verschiedener Kombinationen aus Wandgeometrie, Beplankung, Verbindungsmittel und Unterkonstruktion bewertet. Mit diesen Angaben können Tragwerksplanungen vorgenommen werden. Diese haben allerdings nur für den gewählten Wandtyp und in engen geometrischen Grenzen Gültigkeit.

## 5 Vorgehensweise

### 5.1 Grundlagen

Zur Beurteilung der Eigenschaften von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen sollen Versuche an kleinteiligen Probekörpern und Bauteilversuche an einzelnen Wänden dienen. Besonderes Interesse gilt den Verbindungen, die in den hier betrachteten Fällen mit metallischen stiftförmigen Verbindungsmitteln hergestellt werden. Holz, Holzwerkstoffe und auch gipsgebundene Werkstoffe sind per se als spröde zu betrachten. Duktile Eigenschaften von Konstruktionen entstehen überwiegend durch metallische stiftförmige Verbindungsmittel (vgl. [27]). Die Untersuchung ganzer Gebäude eines speziellen Bautyps erscheint nicht als zielführend, da die in Deutschland gebräuchliche Planung eines Tragwerks, bzw. Gebäudes die einzelnen Komponenten aufgrund einer Bemessung zusammenfügt. Es ist unüblich, sich auf bekannte Konstruktionen zu beschränken. Dies würde die Planungsvielfalt stark einschränken. Gipsgebundene Plattenwerkstoffe werden überwiegend bei der Herstellung von vorgefertigten Einfamilienhäusern verwendet, finden aber auch im mehrgeschossigen Wohnbau Anwendung. Hier entstehen meist sehr individuelle Gebäude.

Um gipsgebundene Plattenwerkstoffe als Beplankung von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise in diesen Bereichen auch in Erdbebengebieten entsprechend ihrer Leistungsfähigkeit einsetzen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Es wurden unterschiedliche Beplankungen aus Gipswerkstoffen unter zyklischer Belastung untersucht. Um die Ergebnisse mit einer Beplankung von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit bekannt hohem duktilem Verhalten zu vergleichen, fanden Referenz-Untersuchungen an Proben mit Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB“ statt (weitere Angaben zu den verwendeten Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB“ sind im folgenden Abschnitt 5.2 zusammengestellt). Eine vollständige Zusammenstellung der durchgeführten Versuche kann dem nachfolgenden Kapitel entnommen werden.

Der Einfluss von langsamen Verschiebungsgeschwindigkeiten – wie bei den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen gewählt - wurde in [18] in Vergleich zu anderen bekannten Untersuchungsmethoden mit verschiedenen Verschiebungsgeschwindigkeiten (Rütteltisch, zyklisch mit hoher Verschiebungsgeschwindigkeit, pseudo-dynamisch oder monoton) betrachtet. Eine zyklische Beanspruchung mit langsamer Verschiebungsgeschwindigkeit liefert im Vergleich zu den anderen Methoden hinreichend genaue Erkenntnisse (vgl. [29]).

### 5.2 Verwendete Plattenwerkstoffe

Es soll nachfolgend ein Überblick über die gewählten Plattenwerkstoffe gegeben und die Auswahl bestimmter Typen begründet werden. Grundsätzlich wurden drei verschiedenen Arten von Plattenwerkstoffen untersucht:

- Gipsplatten mit einer kartonummantelten Gips-Kernmatrix
- Gipsfaserplatten, bestehend aus homogen vermischten Zellulosefasern und Gips
- Holzwerkstoffplatten des Typs OSB, bestehend aus ausgerichtet miteinander verklebten langen Grobspänen

Die kartonummantelten Gipsplatten werden als nichttragendes Bauprodukt europäisch nach DIN EN 520 geregelt. Bei diesen Platten handelt es sich um einen kostengünstig herzustellenden gipsgebundenen Plattenwerkstoff der auch als Brandschutzbekleidung geeignet ist. Die Produktionsgeschwindigkeit liegt bei ca. 120 m Plattenmaterial pro Minute. Es werden verschiedenen Arten von Gipsplatten unterschieden:

- Gipsplatte Typ „A“;  
auf der Ansichtsseite kann ein Gipsputz oder eine dekorative Beschichtung aufgebracht werden
- Gipsplatte Typ „H“;  
die Gipsplatte enthält Zusätze, die die Wasseraufnahme reduzieren, z.B. zur Anwendung in Feuchträumen

- Gipsplatte Typ „E“;  
die Platten dienen als äußere Bekleidung von Außenwand-Elementen, sind aber nicht zur dauerhaften Bewitterung vorgesehen
- Gipsplatte Typ „F“;  
im Brandfall besitzen diese Platten einen verbesserten Gefügezusammenhalt aufgrund von hinzugefügten Fasern und weiteren chemischen Zusätzen
- Gipsplatte Typ „P“;  
Platten auf die Kaschierungen oder andere Stoffe aufgeklebt werden können
- Gipsplatte Typ „D“;  
diese Platten besitzen eine definierte Dichte
- Gipsplatte Typ „R“;  
die Bruchfestigkeit dieser Platten ist sowohl in Längs- als auch in Querrichtung erhöht
- Gipsplatte Typ „I“;  
Gipsplatten mit einer erhöhten Oberflächenhärte

Die einzelnen Plattenarten kommen je nach gewünschten Eigenschaften zur Anwendung. Eine Kombination der Typenbezeichnungen ist vorgesehen. Für die Untersuchung von Platten erscheinen drei Typen interessant. Dabei handelt es sich um die Typen „D“, „F“, und „R“.

Platten mit der Typenbezeichnung „D“ haben nicht nur eine definierte Dichte. Die Dichte dieser Platten ist in der Regel größer als die Dichte gewöhnlicher kartonummantelter Gipsplatten. Nach den Erkenntnissen von Tichelmann [11] kann danach auf eine Erhöhung der mechanischen Beanspruchbarkeit geschlossen werden, da diese mit zunehmender Rohdichte ebenfalls ansteigt.

Gipsplatten mit der Typenbezeichnung „F“ haben einen verbesserten Gefügezusammenhalt. Dieser entsteht durch die Zugabe von Fasern zur Gipsmatrix. Die Fasern wirken wie eine Bewehrung und es ist anzunehmen, dass sie die mechanische Beanspruchbarkeit steigern.

Mit „R“ bezeichnete Gipsplatten verfügen über eine erhöhte Bruchfestigkeit in Längs- und Querrichtung. Meist resultiert diese aus einer hochwertigeren Kartonummantelung. Diese erhöhte Bruchfestigkeit führt ebenfalls zu einer höheren Beanspruchbarkeit.

Für die Untersuchungen wurden Gipsplatten mit der Typenbezeichnung „DF“ und Gipsplatten mit der Typenbezeichnung „D“, „F“ und „R“ gewählt. Aufgrund dieser gewählten Typen wird ein gutmütiges Verhalten der Gipsplatte im Vergleich zu anderen Typen von Gipsplatten erwartet.

Gipsfaserplatten werden aus einem homogen vermengten Gemisch aus Zellulosefasern und Gips hergestellt. Das Gemisch wird auf ein Sieb-Band gestreut und während des Streuprozesses mit Wasser benetzt. Anschließend wird das unverdichtete Gemenge in einem Fließprozess durch eine Presse verdichtet. Diese Platten haben daher ein gleichförmigeres mechanisches Verhalten als Gipsplatten. Aufgrund einer nur geringen Ausrichtung der zugegebenen Fasern ist die Orthotropie geringer ausgeprägt als bei den zuvor beschriebenen Gipsplatten.

Gipsfaserplatten werden wie kartonummantelte Gipsplatten ebenfalls in verschiedene Typen unterschieden. Diese sind in DIN EN 15283-2 definiert. Sie beschreibt die durch die nachfolgend genannten Kennzeichnungen definierten Eigenschaften:

- Gipsfaserplatten werden, sofern die Anforderungen an DIN EN 15283-3 erfüllt sind, mit dem Typ „GF“ gekennzeichnet
- Platten mit einer geringeren Wasseraufnahmefähigkeit der gesamten Platte erhalten die zusätzliche Bezeichnung „H“
- geringere Wasseraufnahmefähigkeit der Oberfläche wird durch die Typen „W1“ und „W2“ gekennzeichnet



- Kennzeichnung „D“ erhalten Platten mit einer erhöhten Rohdichte
- erhöhte Biegefestigkeit weisen die Typen „GF-R1“ und „GF-R2“ auf
- Typenbezeichnungen „C1“ und „C2“ beschreiben erhöhte Anforderungen an die Dickentoleranz
- Gipsfaserplatten mit der Bezeichnung „I“ verfügen über eine erhöhte Rohdichte

Aufgrund seiner guten mechanischen Eigenschaften findet das Produkt Anwendung im Bereich des Holzrahmenbaus zur Ausbildung von Wandscheiben. Dazu werden allerdings nicht alle Typen verwendet. In der Regel werden Gipsfaserplatten mit normaler Rohdichte verwendet. Gipsfaserplatten mit stark erhöhter Rohdichte lassen sich technologisch nicht mehr mit den üblichen Werkzeugen und Verbindungsmitteln des Holzrahmenbaus befestigen. Die Platten sind zu „hart“. Für die tragende Anwendung im Holzbau bedürfen Gipsfaserplatten einer Europäischen technischen Bewertung oder einer Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassung, da diese nicht wie kartonummantelte Gipsplatten nach DIN EN 520 und DIN 18180 durch DIN EN 1995-1-1 geregelt sind.

Gipsfaserplatten mit erhöhter Dichte werden beispielsweise für Doppel- und Hohlboden-Systeme verwendet. Dabei werden Rohdichten bis zu 1.600 kg/m<sup>3</sup> erreicht.

Es wird erwartet, dass von dem größeren mechanischen Leistungsvermögen unter statischer Beanspruchung im elastischen Bereich der im Holzrahmenbau üblicherweise verwendeten Gipsfaserplatten ein ebenfalls größeres Leistungsvermögen unter zyklischer Beanspruchung im Erdbebenfall abzuleiten ist. Besonders bei der lokalen Beanspruchung der Verbindungsmittel wird ein besseres Verhalten erwartet.

Referenz-Untersuchungen wurden mit Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB“ durchgeführt. Platten dieses Typs sind der am meisten verwendete Holzwerkstoff zur Herstellung von Wandscheiben. Neben diesem werden überwiegend Spanplatten und Baufurnierschichtholzplatten verwendet.

„OSB“ ist durch DIN EN 300 geregelt. Es werden vier Typen unterschieden:

- „OSB/1“ Platten für allgemeine, nicht tragende Zwecke und für Inneneinrichtungen zur Verwendung im Trockenbereich.
- „OSB/2“ Platten für tragende Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich.
- „OSB/3“ Platten für tragende Zwecke zur Verwendung im Feuchtebereich.
- „OSB/4“ hochbelastbare Platten für tragende Zwecke zur Verwendung im Feuchtebereich.

Baupraktisch werden „OSB/3“ und „OSB/4“ verwendet. Eine Anwendung im Feuchtebereich schließt die Anwendung im Trockenbereich ein. In verschiedenen Untersuchungen wurde das ausgeprägt duktile Verhalten von Wandscheiben mit einer Beplankung aus „OSB“ Platten bereits nachgewiesen. Hier seien exemplarisch die Untersuchungen von Rainer, Lepper und Karacabeyli [25 und 26] genannt. In der hier vorliegenden Publikation wurden Platten des Typs „OSB/4“ der Nenndicken 12,0 mm und 15,0 mm untersucht. Dabei ist eine Plattendicke von 12,0 mm als geringste anzuwendende Plattendicke zu betrachten. Platten mit Breiten größer 1,25 m haben üblicherweise eine Lieferdicke von mindestens 15,0 mm. Der Plattentyp „OSB/4“ verfügt über die größten Steifigkeitswerte innerhalb der verschiedenen „OSB“-Plattentypen. Bereits ab einer Nenndicke von 12,0 mm der Platte des Typs „OSB/4“ bilden sich rechnerisch zwei Fließgelenke an der als Verbindungsmittel vorgesehenen Klammer aus.

### 5.3 Verbindung des Plattenwerkstoff mit der Unterkonstruktion

Die Verbindung des Plattenwerkstoffs mit der Unterkonstruktion kann durch Verklebung oder mittels stiftförmigen Verbindungsmitteln erfolgen. Hinsichtlich einer Erdbebenbeanspruchung wird eine Verklebung nicht weiter betrachtet, da dies zu einer sehr spröden Verbindung von Plattenwerkstoff und Unterkonstruktion führt. Infolgedessen ist die Wandscheibe weniger duktil als bei einer Verbindung mittels üblichen stiftförmigen Verbindungsmitteln.

Für die Herstellung von stiftförmigen Verbindungen von Plattenwerkstoffen mit einer Unterkonstruktion werden metallische Verbindungsmittel wie Nägel, Schrauben oder Klammern verwendet. Durch die Wahl eines metallischen Verbindungsmittels besitzt diese Verbindung ein höheres Maß an Duktilität als z. B. geklebte Verbindungen. Innerhalb der metallischen Verbindungsmittel wurden Klammern gewählt, da diese mit dem geringsten Durchmesser der metallischen Verbindungsmittel hergestellt werden und so bei geringeren Scherkräften an der einzelnen Verbindung das Fließmoment des Verbindungsmittels erreicht wird (vgl. [28]). Eine Kaltverfestigung, wie sie bei Schrauben durch das Anrollen eines Gewindes auftritt, bleibt aus. Es wurde eine Klammer mit Durchmesser 1,5 mm und Länge 50 mm gewählt.

Im Rahmen der hier publizierten Untersuchungen wurden zyklische Untersuchungen mit Biegebeanspruchung an verschiedenen metallischen Verbindungsmitteln durchgeführt. Dabei wurde der Biegewinkel im Verlauf der Beanspruchung vergrößert. Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abschnitt 7.3 beschrieben. Diese bestätigen die Annahme, dass Klammern eine gute Eignung im Vergleich zu anderen metallischen stiftförmigen Verbindungsmitteln besitzen.

## 5.4 Verwendete Unterkonstruktion

Da die wesentliche Betrachtung der hier publizierten Untersuchung dem Plattenwerkstoff gilt, wurde eine übliche Unterkonstruktion gewählt, die ein allgemeingültiges Ergebnis zulässt. Ein Versagen der Unterkonstruktion sollte nicht auftreten bzw. ausgeschlossen sein. Die Unterkonstruktion wurde aus technisch getrocknetem keilgezinktem Vollholz mit den Querschnittsabmessungen 60 mm x 160 mm hergestellt. Die Querschnittsabmessungen entsprechen den üblichen Abmessungen im Holzrahmenbau. Die Festigkeitsklasse des Holzes wurde mit C24 nach DIN EN 338 gewählt. Das Nadelholz (Fichte) entspricht der Sortierklasse S10 nach DIN 4074-1:2012-06 „Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelholz“.

## 5.5 Versuchsumfang

Es wurden insgesamt 74 Versuche an Scherkörpern unterschiedlicher Beplankung und 41 Versuche an Wandscheiben unterschiedlicher Beplankung durchgeführt. Eine genaue Aufstellung zu den einzelnen Versuchen kann Anhang A entnommen werden. Die im Rahmen der Untersuchungen durchgeführten Versuche sind dort bezüglich der Anzahlen und unterschiedlichen Plattenwerkstoffe zusammengestellt. Aus den Versuchen sollen die für die weiteren Untersuchungen notwendigen Parameter gewonnen werden. Nähere Angaben dazu folgen in der Beschreibung der Untersuchungsmethoden.

Für die Bestimmung des Versuchsablaufs der zyklischen Versuche wurden monotone Vorversuche durchgeführt. Daher unterteilt sich das Versuchsprogramm in Vorversuche mit monotoner Belastung und nachfolgend zyklische Versuche zur Bestimmung der Eigenschaften unter Erdbebenbeanspruchung. Die Anzahl an Vorversuchen und Versuchen je Plattenwerkstoff belief sich in der Regel auf:

Tabelle 5.5.1 Übliche Anzahl an Versuchen je Plattenwerkstoff

Versuch	Anzahl Vorversuche	Anzahl Versuche
Scherkörper	3 Stk.	6 Stk.
Wandscheibe	2 (1) Stk.	3 Stk.

In einzelnen Fällen wurde von der üblichen Anzahl abgewichen, bei z.B. veränderten Parametern (Anzahl an Zyklen, Veränderung des Verbindungsmittelabstands, Einfügen einer Gleitfolie). Versuche an Wandscheiben wurden sowohl mit Auflast als auch ohne Auflast durchgeführt. Diese wurde als vertikal wirkende Linienlast am Wandkopf eingeleitet.

Abschließend wurden Referenz-Versuche und Versuche mit Modifikationen zur besseren Bewertung des Einflusses verschiedener Parameter durchgeführt. Diese wurden an Wandscheiben mit einer Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB“ durchgeführt. Dieser Plattentyp hat ein bekannt gutes Verhalten unter Erdbebenbeanspruchung.

## 5.6 Untersuchungsmethode zum lokalen Verhalten der Verbindung an Scherkörpern

Im folgenden Abschnitt wird der Versuchsaufbau der kleinteiligen Untersuchungen an Scherkörpern beschrieben. Dazu wurden eine Probekörpergeometrie und der Versuchsaufbau entwickelt. Der Versuchsablauf orientiert sich an den Vorgaben der EN 12512 hinsichtlich der zyklischen Belastung.

### Geometrie der Scherkörper

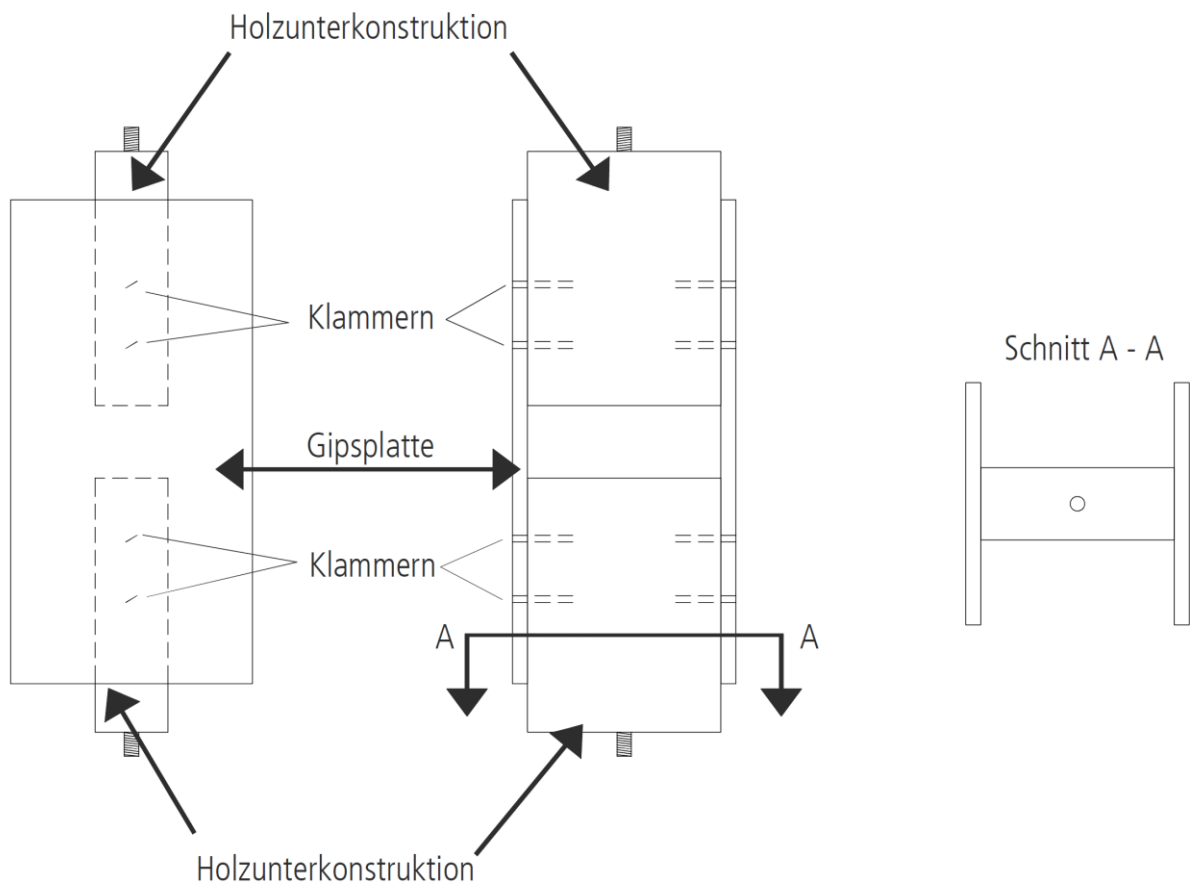


Bild 5.1 Schematische Skizze der Scherkörper zur Prüfung des duktilen Verhaltens einer einschnittigen Verbindung von (Gips-)Platte und Holzunterkonstruktion.

Die Geometrie der Probekörper wurde aus den Untersuchungen „Tragverhalten von hybriden Systemen in Leichtbauweise mit Gipswerkstoffplatten“ [11] weiterentwickelt. Ergänzend zu der dort gewählten Geometrie wurden die Scherkörper so konzipiert, dass lediglich eine Translation in der Lastachse stattfinden konnte. Je Scherkörper und Anschlussseite sind 4 Verbindungsmittel eingebracht worden. Die Translation wurde am Probekörper gemessen. Bei der Wahl der Geometrie der Scherkörper wurden Anforderungen hinsichtlich möglicher Versagen und einer gleichmäßigen Lastverteilung berücksichtigt. Der Probekörper wurde orthogonal symmetrisch aufgebaut und in der faserparallelen Achse der Holzunterkonstruktion zyklisch belastet. Ein Versagen der Holzunterkonstruktion und der gipsgebundenen Platten per se wurde durch Wahl entsprechender geometrischer Abmessungen ausgeschlossen. Die Unterkonstruktion wurde aus Nadelholz (Fichte) C24/S10 nach DIN 4074-1 mit einem Querschnitt von 60 mm x 160 mm hergestellt. Das Versagen wurde auf die Verbindungen der Gipsplatten mit der Holzunterkonstruktion konzentriert, da hier das duktile Verhalten der Verbindung betrachtet werden sollte. Somit wurden weitere mögliche Versagen, wie z.B. Zug- oder

Druckversagen der Gipsplatte, ausgeschlossen. Zum effektiveren Anschluss der Scherkörper an die Versuchseinrichtung wurden Gewindestäbe in die Holzunterkonstruktion eingeklebt. Um eine reine Translation sicherzustellen, wurde für jede Prüfung eine Linearführung auf dem Scherkörper befestigt. Die Reibung, eine Rotation um die Lastachse und die orthogonalen Achsen sowie eine Translation in die zur Lastachse orthogonalen Achsen wurden somit auf ein tolerables Minimum reduziert.

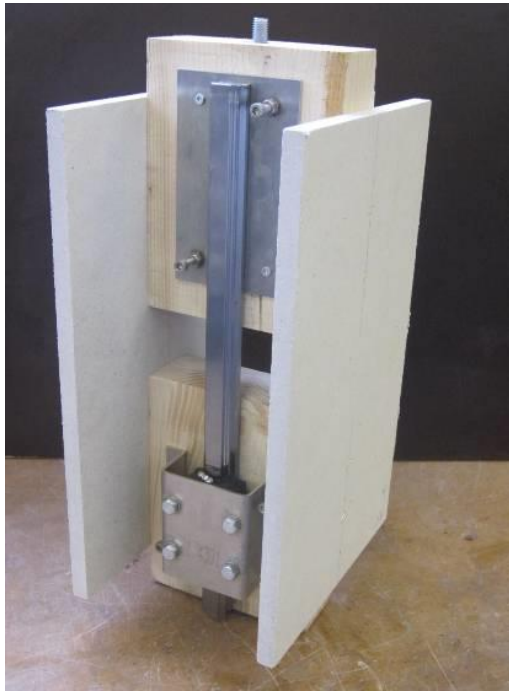


Bild 5.2 Scherkörper mit Linearführung;  
Ansicht Führungsschiene. Quelle: VHT

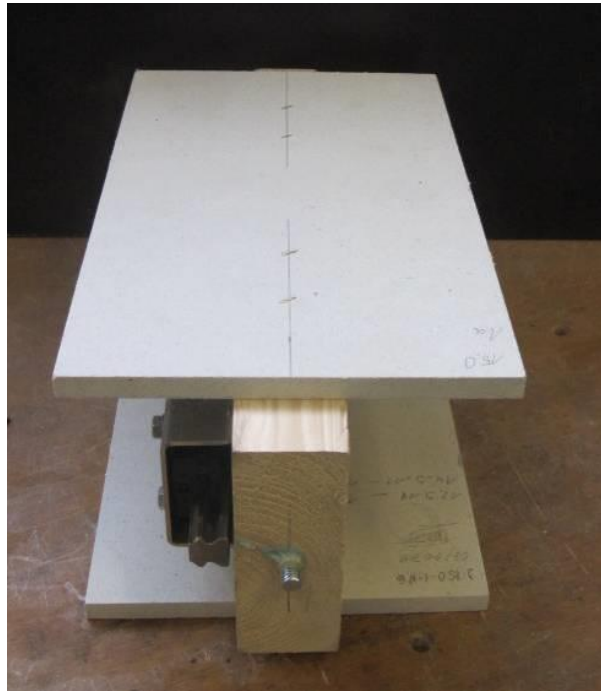


Bild 5.3 Scherkörper mit Linearführung; Ansicht  
Plattenseite. Quelle: VHT

Aus der gewählten Geometrie der Scherkörper resultiert, dass die Verschiebungen an zwei Anschlussseiten mit jeweils 4 Verbindungsmitteln auftreten. Die Größe der Verschiebungen wird als an allen Verbindungen gleich betrachtet. Die Verschiebungen an einer Anschlussseite betragen die Hälfte der Gesamtverschiebung, die am Probekörper gemessen wird. Die Last ist an beiden Anschlussseiten des Scherkörpers gleich groß. Je Anschlussseite wird die Last von vier Verbindungen getragen. Die Größe der Kraft je einzelner Verbindung wird ebenfalls als gleich betrachtet. Somit entsteht ein Mittelwert aus 8 Verbindungen, der hinsichtlich der duktilen Eigenschaften der Verbindung untersucht wird. Da die Ergebnisse zur Beurteilung gesamter Bauteile mit einer größeren Anzahl an Verbindungsmitteln genutzt werden, ist diese Vorgehensweise hinreichend genau. Als Verbindungsmittel wurden Klammern mit den Abmessungen 1,53 x 50 mm gewählt. Die Beplankungswerkstoffe wurden auf der Holzunterkonstruktion befestigt. Die Probekörper wurden handwerklich fachgerecht hergestellt. Die als Verbindungsmittel verwendeten Klammern wurden mit einem druckluftbetriebenen Klammergerät eingebracht. Die Eintreibtiefe wurde mittels eines Druckminderers und eines Einschlagtiefebegrenzers geregelt. Der Winkel zwischen Klammerrücken und Faserrichtung des Holzes betrug 60°.

### **Aufbau der Versuche an Scherkörpern**

Die Prüfungen fanden auf einer Universalprüfmaschine mit regelbarer Traversengeschwindigkeit statt. Die Prüfkörper wurden zwischen zwei gelenkigen Widerlagern eingebracht. Der Prüfkörper selbst war damit als Pendelstab anzusehen. An den Enden des Prüfkörpers befand sich jeweils ein Kardangelenk. Mittels der linearen Führung wurden die

Teile der Unterkonstruktion miteinander verbunden. Diese Führung erlaubte dem Probekörper eine Translation in Richtung der Längsachse (parallel zur Faser-Richtung) der Unterkonstruktion. Diese Translation wurde durch die Widerstandskraft der Verbindungen behindert.

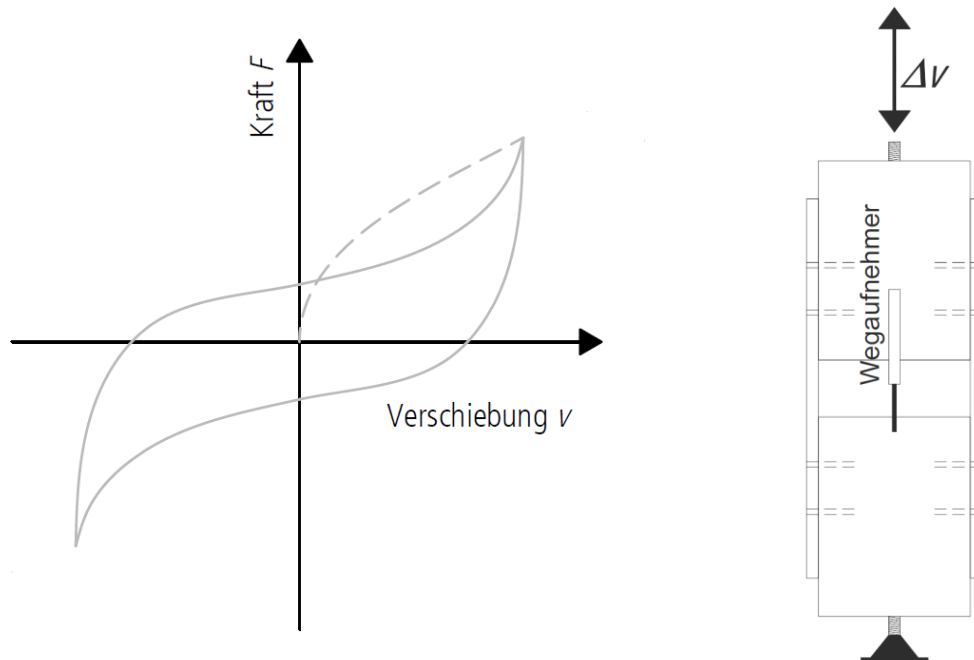


Bild 5.4 Zyklische Beanspruchung der Scherkörper. Die Verschiebungen werden in der faserparallelen Achse der Holzunterkonstruktion aufgebracht. Die Beanspruchung beginnt mit einem Druckhalbzylinder (strichniert gekennzeichnet) und setzt sich im Zughalbzylinder fort. Diese Beanspruchung wiederholt sich mit zunehmender Verschiebung bis zum Versagen der Verbindung.

Die achsialen Verschiebungen wurden an der Unterkonstruktion mit einem induktiven Wegaufnehmer kontinuierlich gemessen und gesteuert. Die wirkenden Kräfte wurden mit einer Zug-/Druckkraftmessdose gemessen. Kraft und Weg wurde per EDV aufgezeichnet und gespeichert.

### **Monotone Versuche an Scherkörpern**

Zur Ermittlung der Fließverschiebung  $v_f$  wurden monotone Vor-Versuche durchgeführt. Die Probekörper wurden mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 0,1 mm/sec bis zum Kraftabfall belastet. Die ermittelte Fließverschiebung (siehe Abschnitt 6.3) dient als Grundlage für die Bestimmung der Amplituden der zyklischen Prüfung, die den Versuchsablauf definieren.

### **Zyklische Versuche an Scherkörpern**

Die zyklischen Versuche wurden in dem gleichen Versuchsaufbau inkl. Versuchseinrichtung durchgeführt wie die monotonen Vorversuche. Vor Durchführung der zyklischen Versuche wurden die Werte der Amplituden der zyklischen Versuche in Anlehnung an DIN EN 12512 bestimmt. Alle zyklischen Versuche wurden nach dem gleichen Versuchsablauf durchgeführt. Abweichend von DIN EN 12512 wurden die zyklischen Versuche bis zum Erreichen eines Abfalls der maximalen Kraft bei Erstbelastung auf  $F_a \leq 0,8 \cdot F_{\max}$  fortgesetzt (siehe Abschnitt 6.4). Eine Fortsetzung der zyklischen Beanspruchung ist erforderlich, um eine Bewertung der Eigenschaften nach dem Prinzip der gleichen Formänderungsarbeit durchführen zu können.

Die Versuche wurden weggesteuert mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,2 mm/sec. durchgeführt. Die Amplituden des üblichen Versuchsablaufs können Anhang B entnommen werden. Sollte bei einer Amplitude von  $10 \cdot v_y$  ein Abfall der Kraft im Erstbelastungszyklus nicht erreicht sein, wird die Amplitude um  $2 \cdot v_y$  gesteigert. Nachfolgend sind die ersten Zyklen des Versuchsablaufs nach DIN EN 12512 abgebildet.

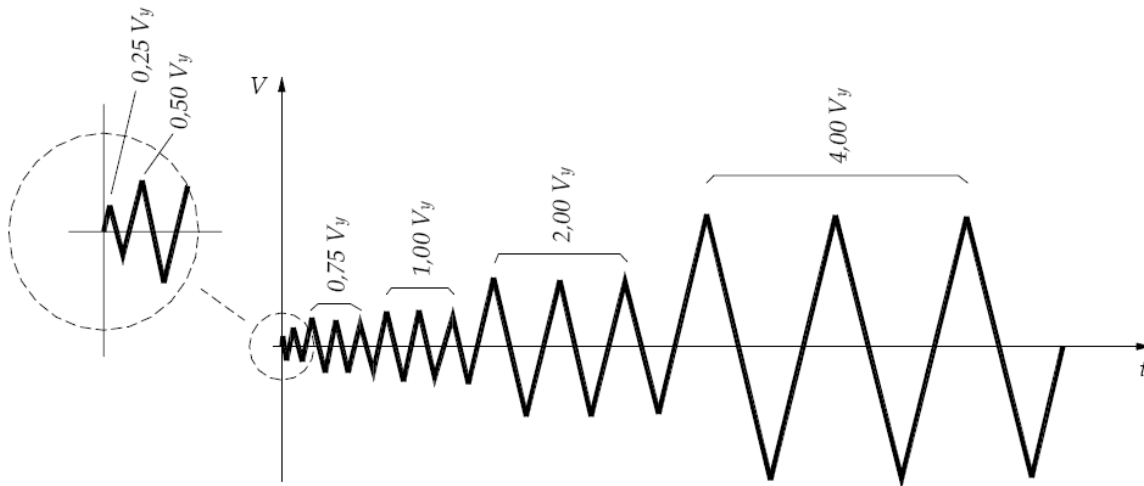


Bild 5.5 Grafische Abbildung der Definition des Versuchsablauf nach DIN EN 12512.

## 5.7 Untersuchungsmethode zum globalen Verhalten an Wandscheiben

Neben den lokalen Eigenschaften der einschnittigen Verbindung (Versuche an kleinteiligen Scherkörpern) wurden auch die globalen Eigenschaften einer Wand untersucht. Lokale Untersuchungen an einer einschnittigen Verbindung bieten die Möglichkeit, sich das Versagen eines Verbindungstyps (Plattenwerkstoff – Verbindungsmittel – Unterkonstruktion) sehr genau zu betrachten. Die Betrachtung des Verhaltens einer einzelnen Verbindung ermöglicht allerdings keine Aussage über das globale Verhalten von Verbund-Bauteilen - in diesem Fall Wandscheiben mit einer Beplankung -.



Bild 5.6      Zyklische Belastung einer mit Gipswerkstoffplatten beplankten Wandscheibe in Holzrahmenbauweise. Die Beanspruchung wird in Wandachse horizontal am Wandkopf aufgebracht. Quelle: VHT

Dies ist dadurch begründet, dass ein globales Verhalten nicht ausschließlich durch die einzelne Verbindung bestimmt wird. Vielmehr spielen bei der Beurteilung von Bauteilen Effekte der Geometrie eine wesentliche Rolle. Durch die Geometrie entstehen ungleichmäßig verteilte Verschiebungen an den Rändern der Wandscheibe. In den Eckbereichen sind die Verschiebungen am größten. Mit zunehmender Verschiebung des Wandkopfes nehmen die Verschiebungen an den Scheibenrändern zu. Erste Verbindungen im Eckbereich der Scheibe versagen bereits; dabei nimmt der Tragwiderstand weiter zu, da weitere Verbindungen durch die größer werdenden Verschiebungen zunehmend aktiviert werden. Dies konnte auch an Wandscheiben mit Beplankung aus Holzwerkstoffplatten festgestellt werden. Diese Aktivierung der Verbindungsmittel in Abhängigkeit der aufgetragenen Verschiebung wirkt sich positiv auf das duktile Verhalten der Wandtafel aus. Das entsprechend der aufgetragenen Verschiebung versetzt stattfindende Versagen der einzelnen Verbindungen führt zu einem geometrisch bedingten nichtlinearen Verhalten der Wandtafel und vergrößert dabei das duktile Potenzial der Wandtafel gegenüber einer einzelnen Verbindung signifikant. Daher ist für Scheiben (global) ein duktileres Verhalten als für einzelne Verbindungen (lokal) zu erwarten.



Das unterschiedliche Verhalten von Materialien und einzelnen Baugliedern im Gegensatz zu dem daraus zusammengesetzten System wird von [30] für Rahmentragwerke aus Holz festgestellt. Es wird festgehalten, dass das Verhalten nur am konkreten System präzise untersucht werden kann. Die gleichen Autoren beschreiben in einer weiteren Publikation [29], dass aufgrund von Vor-Ort-Versuchen an einem Musterhaus in Holztafelbauweise festgestellt wurde, dass für das dynamische Verhalten im Wesentlichen die Wandscheiben verantwortlich sind.

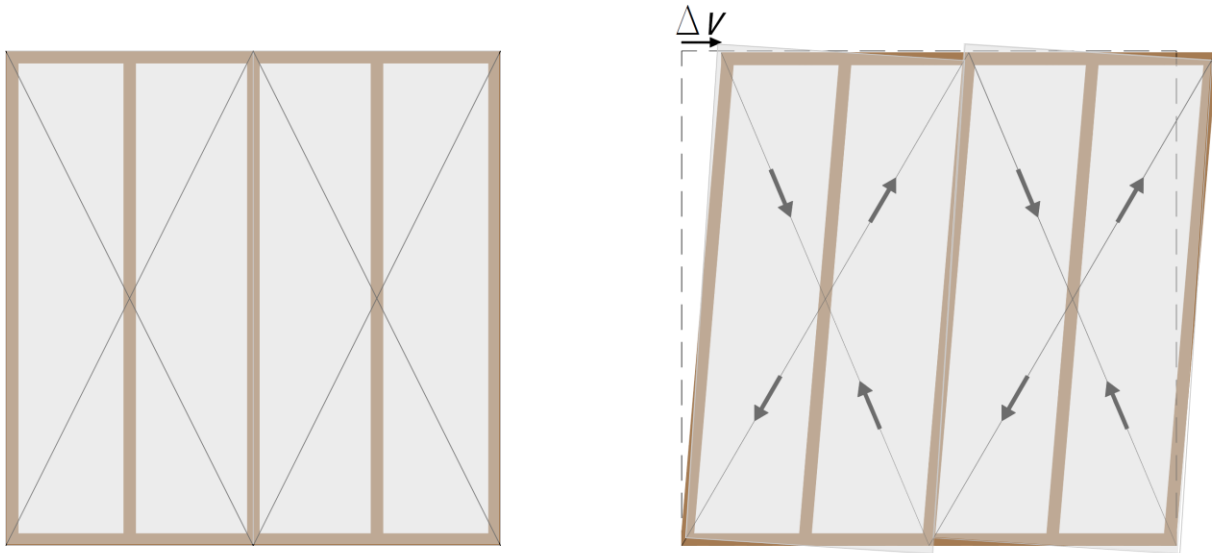


Bild 5.7 Verformungsverhalten einer 2-Raster Wandtafel in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus zwei Platten im 1-Rasterformat. Auf der linken Bildhälfte ist die unverformte Wandscheibe abgebildet. Rechts ist das Verformungsverhalten der Wandscheibe unter der aufgetragenen Verschiebung  $\Delta v$  abgebildet.

In den Diagonalen der 1-Raster Beplankungen (grau hinterlegt) entstehen Dehnungen und Stauchungen, die Beplankungen verzerren und verdrehen sich. Dabei sind die größten Verschiebungen in den Ecken der Wandtafel zu finden.

Ziel der Untersuchungen war die Feststellung der Anwendungseigenschaften von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen unter Erdbebenbeanspruchung. Speziell sollten die viskose Dämpfung, das Energiedissipationsvermögen, der Verhaltensbeiwert und der Überfestigkeitsfaktor betrachtet und bestimmt werden.

### **Geometrie der Wandscheiben**

Die Herstellung der Wandscheiben wurde handwerklich durchgeführt. Die Versuchskörper wurden in Anlehnung an DIN EN 594:2011-09 „Holzbauwerke - Prüfverfahren - Wandscheiben-Tragfähigkeit und -Steifigkeit von Wandelementen in Holztafelbauart“ hergestellt. Die Wandscheiben hatten die Abmessungen Länge x Breite = 2,50 m x 2,50 m. Der Achsabstand der Rippen der Wandscheiben betrug 625 mm. Die Holzrahmenkonstruktion wurde mit den verschiedenen Plattenwerkstoffen beplankt. In der Regel hatten die Plattenwerkstoffe die Abmessungen von 1,25 m x 2,50 m und es wurden jeweils zwei Platten auf einer Wandseite aufgebracht. Es wurden einseitig beplankte und beidseitig beplankte Wandscheiben untersucht. Die Klammern wurden mittels eines druckluftbetriebenen Klammergeräts eingebracht. Die Eintreibtiefe wurde mittels eines Druckminderers und Einschlagtiefenbegrenzers geregelt. Der Winkel zwischen Klammerrücken und Faserrichtung des Holzes betrug 60°.



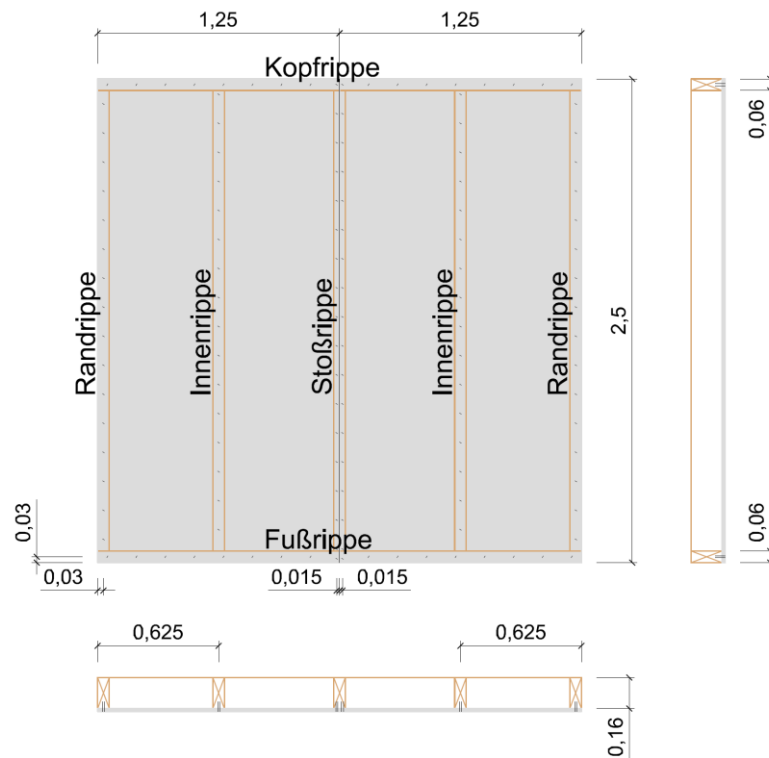


Bild 5.8 Exemplarische Abbildung der Wandscheiben in Holzrahmenbauweise. Für die Regel-Versuche an Wandscheiben mit einer Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen wurden die Klammerabstände und die Anzahl der beplankten Seiten (einseitig oder beidseitig) variiert. Maße in Meter. Der Winkel zwischen Klammerrücken und Holzfaser betrug 60°.

#### Aufbau der Versuche an Wandscheiben

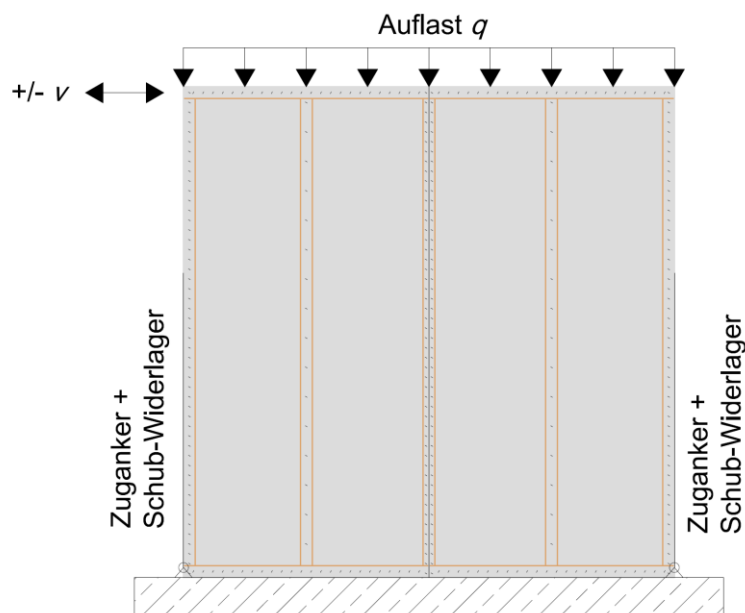


Bild 5.9 Schematische Abbildung der Lagerung Wandscheiben in Holzrahmenbauweise und der aufgetragenen Verschiebungen sowie ggf. der aufgetragenen Auflast.

Die Wandscheiben wurden in einen für diese Untersuchungen speziell modifizierten Versuchsaufbau eingebaut. Die Fußrippe wurde unverschieblich und vollflächig auf einem Stahlträger gelagert. Mittels seitlich angebrachter Stahlschen wurden die Rotationskräfte in den unverschieblich gelagerten Schwellenträger eingeleitet. Die zyklische Beanspruchung wurde über die Kopfrippe in die Wandscheibe eingeleitet. Die Verbindung der Beplankung mit den Rippen konnte unbehindert über den Rand der Holzunterkonstruktion verschoben werden. Mit einem Lastverteilungsprofil aus Stahl wurde die vertikale Auflast am Wandkopf eingeleitet. Durch vorgespannte Gewindestäbe zwischen dem Lastverteilungsprofil am Wandkopf und dem Stahlträger unterhalb der Fußrippe wurde die Auflast generiert und mit Kraftmessdosen deren Größe kontinuierlich gemessen (eine genauere Beschreibung mit Bild kann Abschnitt 6.2 entnommen werden).

Die zyklischen Belastungen wurden mit einem gesteuerten Hydraulikzylinder erzeugt. Die horizontale Kopfverschiebung des Wandelements im Bereich der Lasteinleitung wurde mit einem induktiven Wegaufnehmer kontinuierlich gemessen und gesteuert. Eine kontinuierliche Kraftmessung in der normalkraftresultierenden Richtung an der Stelle der Lasteinleitung am Wandkopf erfolgte mittels einer Druck/Zugmessdose.

### **Monotone Versuche an Wandscheiben**

Zur Ermittlung der Fließverschiebung  $v_y$  wurden monotone Versuche an den Wänden in Anlehnung an DIN EN 594 durchgeführt. Diese dienten als Grundlage zur Definition des Versuchsablaufs der zyklisch beanspruchten Wandscheiben in Anlehnung an DIN EN 12512. Dies entspricht im Prinzip dem gleichen Versuchsablauf der zur Untersuchung der kleinteiligen Scherkörper verwendet wurde.

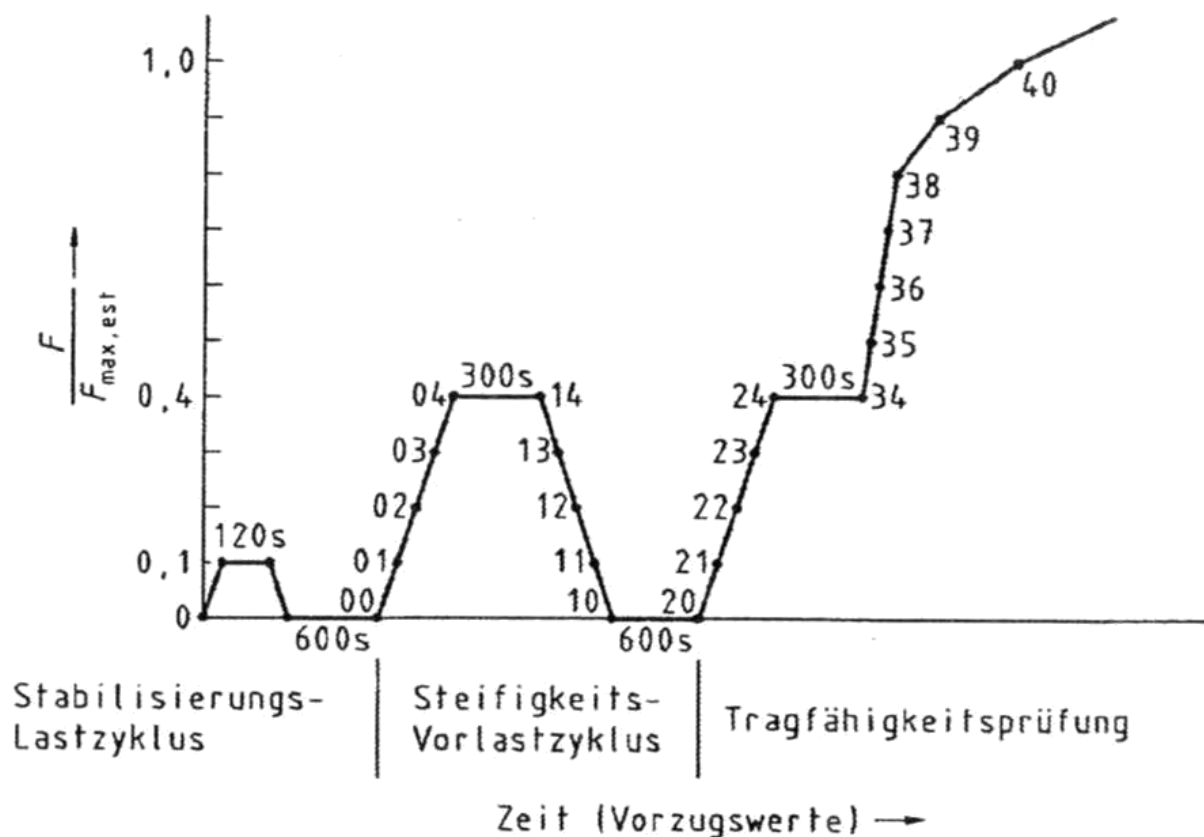


Bild 5.10 Versuchsablauf nach DIN EN 594.

Im Verlauf der monotonen Wandscheibenversuche wurden die Probekörper bis zum Kraftabfall auf 80% von  $F_{max}$  verformt. Bei der Durchführung der Untersuchung ist sowohl für die monotonen Vor-Versuche als auch für die zyklischen Versuche der gleiche Versuchsaufbau, inkl. Versuchseinrichtung verwendet worden. Es unterscheiden sich lediglich die Versuchsabläufe.

### **Zyklische Versuche an Wandscheiben**

Alle Versuchsreihen wurden in Anlehnung an den Versuchsablauf nach DIN EN 12512 durchgeführt. Der Versuchsablauf kann exemplarisch in tabellarischer Form Anhang B und dem Bild 5.5 entnommen werden. Für die Versuche wurden Horizontalverschiebungen auf Grundlage einer definierten Fließverschiebung  $u_f$  vorgegeben. Die Versuche sind weggesteuert mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,2 mm/sec durchgeführt worden. Abweichend von der Beurteilungsgrundlage nach DIN EN 1998-1 wurden die Prüfungen nicht beim Erreichen des Grenzkriteriums – eine Minderung der maximalen Reaktionskraft um 20% innerhalb eines Zyklenskollektivs (ein Zyklenskollektiv besteht aus 3 Zyklen gleicher Amplitude) – abgebrochen. Die Prüfungen wurden bis zum Erreichen einer Minderung der Reaktionskraft um 20% von dem jeweils ersten Zyklus eines Zyklenskollektivs zum ersten Zyklus des nachfolgenden Zyklenskollektivs durchgeführt (siehe Abschnitt 6.4). Mit jedem Zyklenskollektiv wurde die Amplitude der Verschiebung erhöht.



## 6 Überlegungen zur Modifikation der Untersuchungs- und Auswertungsmethoden

### 6.1 Beweggründe für die Modifikation

Während der Durchführung der ersten Untersuchungen wurden verschiedene Parameter und Randbedingungen des Versuchsablaufs, der Auswertung sowie der zur Bewertung notwendigen Erkenntnisse angepasst. Dies geschah, um die Qualität der Ergebnisse zu verbessern und um getroffene Annahmen anzupassen. Dabei konnte sowohl eine Reduzierung der Versuche als auch eine Verbesserung der getroffenen Aussagen erzielt werden. Nachfolgen sind die wesentlichsten Überlegungen, die zu Modifikationen führten, zusammengefasst. Sie sollen auch für später Untersuchungen Hinweise geben, an welchen Stellen übliche Untersuchungsmethoden angepasst werden können.

### 6.2 Aufbringen einer Auflast bei Untersuchungen an Wandscheiben

Um den Einfluss einer vertikalen Belastung der Wand zu betrachten, wurden Untersuchungen mit einer Auflast auf den Wandscheiben in Holzrahmenbauweise durchgeführt. Die Auflast wurde in Form einer Vorspannung über ein Lastverteilungsprofil im Bereich der Kopfrippe in die Wand eingeleitet. Es wurde eine vertikale Auflast von 16 kN/m simuliert. An den in Wand-Achse eingebauten Gewindestäben wurde die Vorspannung mittels zweier kalibrierter Kraft-Messkörper kontinuierlich gemessen. Bei signifikanten Abweichungen der tatsächlichen Auflast zur planmäßigen Auflast wurde die Vorspannung entsprechend angepasst.



Bild 6.1 Versuchsaufbau einer Wandscheibe mit einer einseitigen Beplankung und Auflast durch Vorspannung. Erkennbar sind die beiden vorgespannten Gewindestäbe mit dem Kraft-Messkörper (rote Markierung). Auf dem Wandkopf ist das Profil zur Verteilung der vertikalen Belastung erkennbar. Quelle: VHT

Zur Untersuchung des Einflusses einer Auflast wurde die Energiedissipation je Zyklus betrachtet. Dabei wurde der Mittelwert der Energiedissipation aus drei Versuchen an Wandscheiben mit Auflast dem Mittelwert der Energiedissipation aus drei Versuchen ohne Auflast gegenübergestellt. Der Ablauf der weggesteuerten Beanspruchung (aufgebrachte Verschiebungen) war bei allen Versuchen gleich.

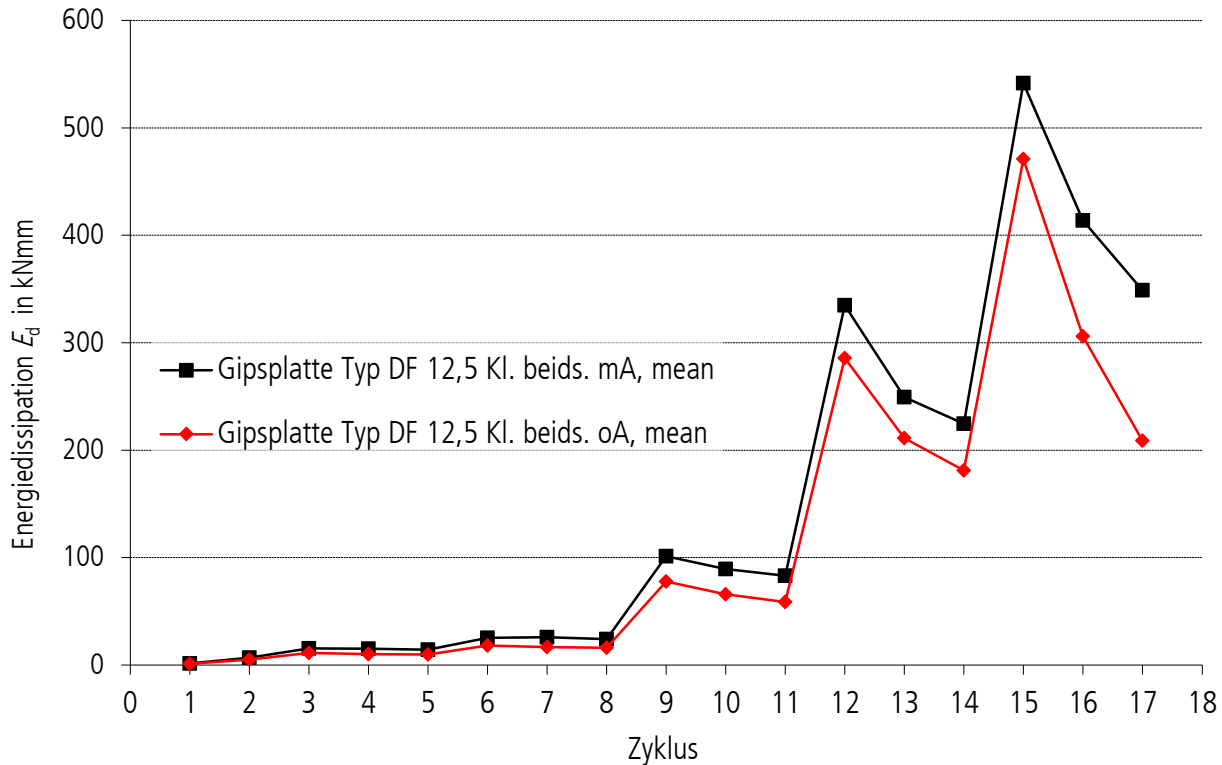


Bild 6.2 Vergleich der Energiedissipation von Versuchen an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Auflast (mA) und ohne Auflast (oA). Mittlerer Verlauf der Energiedissipation von Wandscheiben mit einer beidseitigen Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DF“ der Nenndicke 12,5 mm.

Um den Einfluss einer möglicherweise höheren potenziellen Energie ebenfalls zu berücksichtigen, wurde die Entwicklung der Dämpfung betrachtet. Bei der Bestimmung der Dämpfung nach DIN EN 12512 fließt die potentielle Energie in den Nenner der Gleichung ein (siehe Abschnitt 6.5). Die Dämpfung wird jeweils im dritten Zyklus eines Zyklenskollektivs bestimmt. Ein Zyklenskollektiv besteht aus drei Zyklen. In Bild 6.3 sind die Werte der Dämpfung zum Ende der Zyklenskollektive abgebildet. Dabei ist festzustellen, dass die Dämpfung von Beginn bis einschließlich dem 14. Zyklus von Wandscheiben mit einer Auflast größer als die Dämpfung von gleichen Wandscheiben ohne Auflast ist. Lediglich im 17. Zyklus ist die Dämpfung einer Wandscheibe ohne Auflast gegenüber einer Wandscheibe mit Auflast größer. Dieses Ergebnis wird in der Bewertung nicht in Betracht gezogen, da hier die Wandscheibe ohne Auflast bereits deutlich geschädigt ist.

Aufgrund der Ergebnisse aus den ersten Untersuchungen wurden weitere Untersuchungen auf Wandscheiben ohne Auflast beschränkt. Diese Entscheidung bildet den ungünstigeren Fall ab. Es wurden geringere Werte der Dämpfung bestimmt. Dies führt zu einer geringeren Abminderung der auf Grundlage eines elastischen Massenschwingers bestimmten Erdbebenbeanspruchung.

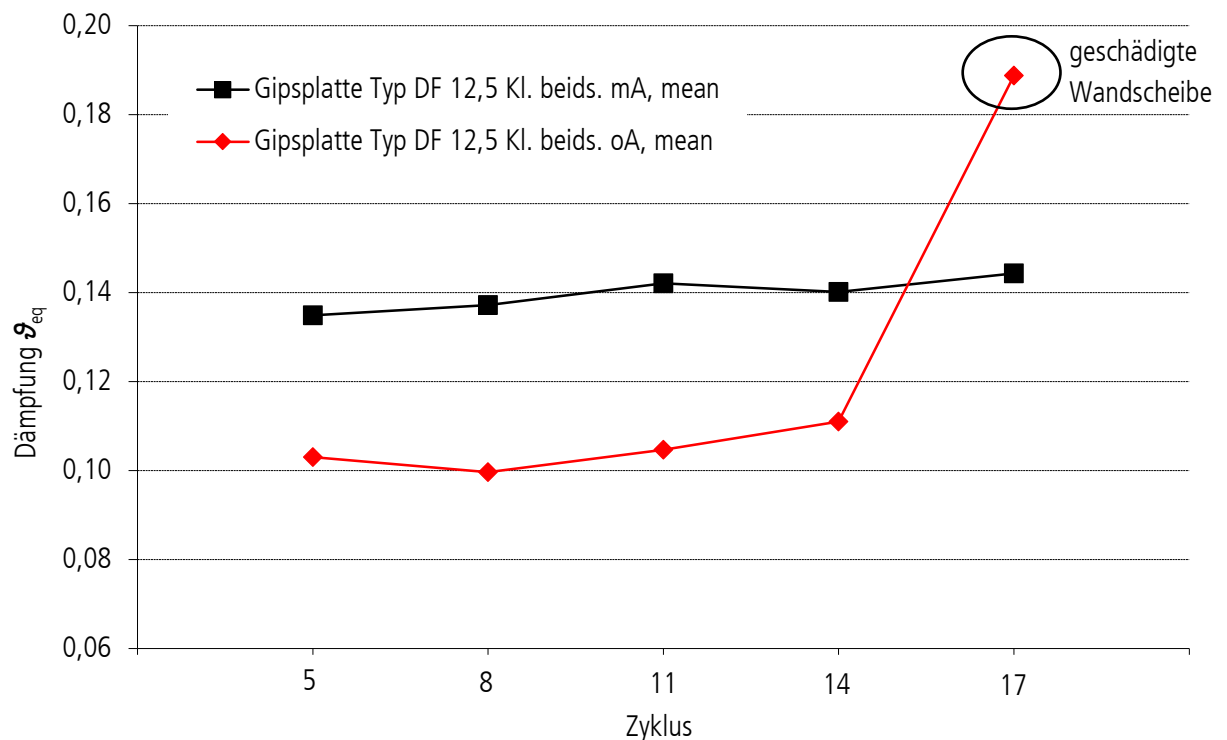


Bild 6.3 Vergleich der Dämpfung von Versuchen an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Auflast (mA) und ohne Auflast (oA). Mittlerer Verlauf der Dämpfung von Wandscheiben mit einer beidseitigen Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DF“ der Nenndicke 12,5 mm.

### 6.3 Bestimmung der Fließverschiebung und Duktilität

Sowohl die Definition des Versuchsablaufs als auch die Bestimmung verschiedener Werte bedürfen der Ermittlung der Fließverschiebung. Die Fließverschiebung soll den Übergang zwischen linearem und nichtlinearem Verhalten anzeigen. Dazu werden in der Literatur verschiedene Vorgehensweisen vorgeschlagen. Nachfolgend werden beispielhaft drei verschiedene Vorgehensweisen betrachtet. Alle haben eine bilineare Arbeitslinie und einen monotonen statischen Belastungsversuch als Ausgangsbasis. Die Verläufe der bilinearen Näherungen unterscheiden sich jedoch wesentlich.

Hinsichtlich der Definition von Duktilität hat die Festlegung der Fließverschiebung einen maßgeblichen Einfluss auf die Größe der Duktilität. Nach DIN EN 12512 ist die Duktilität durch folgende Gleichung definiert.

$$D = \frac{v_u}{v_y} \quad (6.1)$$

Dabei führt eine größere Grenzverschiebung  $v_u$  und eine kleinere Fließverschiebung  $v_y$  zu einer größeren Duktilität. Das Bauteil beginnt bei geringen Verschiebungen zu Fließen und der Bruch tritt bei verhältnismäßig großer Verschiebung ein.

Nach DIN EN 12512 wird ein linearer Anteil des Arbeitslinienverlaufs zwischen  $0,1 F_{max}$  und  $0,4 F_{max}$  bestimmt. Für die Charakterisierung des bilinearen Verhaltens wird ein zweiter linearer Anteil durch eine Tangente mit  $1/6$  der Steigung des ersten linearen Anteils an den weiteren Arbeitslinienverlauf gebildet. Aus beiden linearen Anteilen ergibt sich ein Schnittpunkt. Die zugehörige Verschiebung ist die Fließverschiebung gemäß DIN EN 12512.

Aus japanischen Forschungseinrichtungen ist eine Methode bekannt, die als  $0,1-0,4-0,9F_u$  Methode bezeichnet wird [2]. Hier wird analog zur DIN EN 12512 ein monotoner statischer Belastungsversuch durchgeführt. Der erste lineare Anteil wird zwischen  $0,1 F_{max}$  und  $0,4 F_{max}$  bestimmt. Zwischen  $0,4 F_{max}$  und  $0,9 F_{max}$  wird im weiteren Verlauf der

Arbeitslinie die Sekante bestimmt. Diese Sekante wird nun als Tangente parallel verschoben an die Arbeitslinie gelegt und bildet dann den zweiten linearen Anteil des bilinearen Diagramms. Vom Schnittpunkt der beiden Anteile wird auf gleichem Kraftniveau die zugehörige Verschiebung der Arbeitslinie als Fließverschiebung definiert.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wird bei gleicher Bestimmung des ersten linearen Anteils der zweite lineare Anteil durch die mittlere Steigung des Arbeitslinienverlaufs oberhalb von  $0,4 F_{\max}$  bestimmt. Der zweite lineare Anteil wird so in die Arbeitslinie gelegt, dass sich zwischen zweitem linearem Anteil und der Arbeitslinie des Versuchs sowohl oberhalb als auch unterhalb gleich viel Flächenanteile befinden. Die Fließverschiebung wird durch den Schnittpunkt von beiden linearen Anteilen bestimmt. Bei diesem Vorgehen entsprechen die Flächenanteile der von dem System geleisteten Arbeit. Das heißt, dass im angenäherten bilinearen Modell die gleiche Arbeit wie im Versuch geleistet werden soll.

Die Versuchsdurchführung für monotone statische Belastungen an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise ist in DIN EN 594 geregelt. Bei der Belastung handelt es sich um einen Versuch mit Vorlast. Wandscheiben, die nicht vorbelastet werden, verhalten sich wesentlich weicher. Für diese sind größere Fließverschiebungen zu erwarten. DIN EN 594 berücksichtigt zur Ermittlung der Steifigkeit sowohl den Bereich ohne Vorlast als auch den vorbelasteten Bereich. Nachfolgend sind die Auswertungen der Fließverschiebung  $v_f$  mit und ohne Berücksichtigung der Vorbelastung eines im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführten Versuchs an einer Wandscheibe mit Beplankung aus Gipsplatten des Typs DF abgebildet.

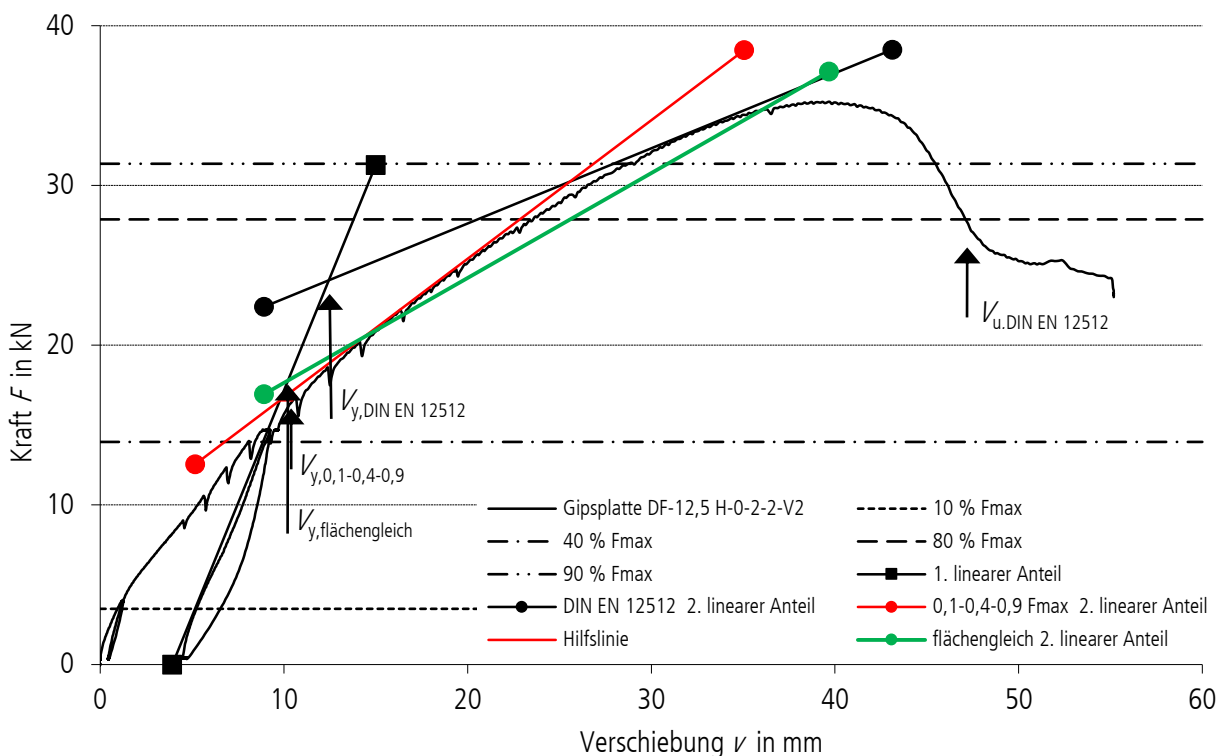


Bild 6.4 Auswertung der Fließverschiebung mit Vorbelastung. Abgebildet sind die Arbeitslinie eines monotonen Wandscheibenversuchs und die verschiedenen bilinearen Näherungsmethoden. Ebenso ist die Grenzverschiebung  $v_u$  abgebildet.

Bild 6.4 zeigt die Auswertung der Fließverschiebung mit Berücksichtigung der Vorbelastung. Der erste lineare Anteil orientiert sich am Wiederbelastungsast nach einer Vorbelastung mit ca. 40 % von  $F_{\max}$ . Um die verschiedenen Ergebnisse ohne Berücksichtigung einer Vorbelastung deutlich zu machen, wird nun nachfolgend das oben abgebildete Diagramm ohne Vorbelastung ausgewertet.



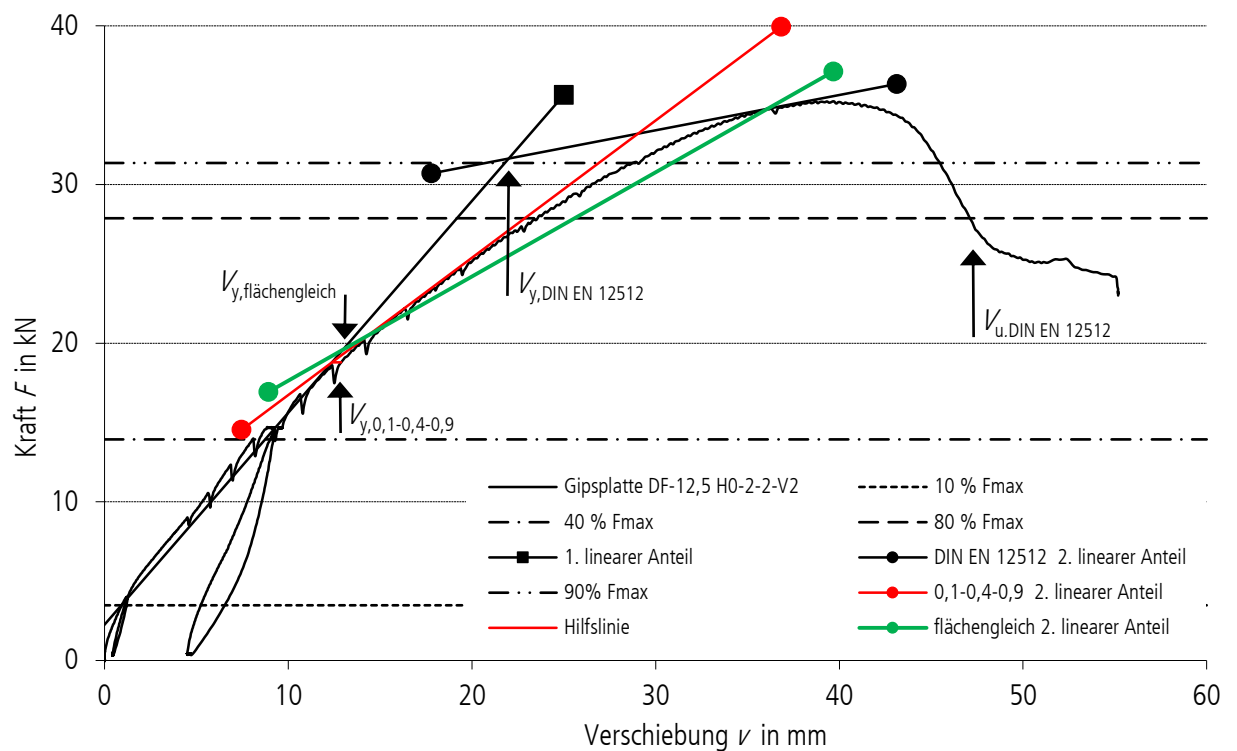


Bild 6.5 Auswertung der Fließverschiebung ohne Vorbelastung. Abgebildet sind die Arbeitslinie eines monotonen Wandscheibenversuchs und die verschiedenen bilinearen Näherungsmethoden.

Bild 6.5 zeigt die Auswertung ohne Berücksichtigung der Vorbelastung. Der erste lineare Anteil orientiert sich an der Erstbelastung. Nachfolgend sind verschiedene Ergebnisse für die Auswertung der Fließverschiebung des gleichen Versuchs tabellarisch zusammengestellt. Es wurden Fließverschiebungen mit und ohne Vorbelastung bestimmt.

Tabelle 6.3.2 Fließverschiebungen einer Wandscheibe in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus Gipsplatten des Typs DF der Nenndicke 12,5 mm gemäß der unterschiedlichen Auswertungsmethoden.

	Fließverschiebung $\nu_f$		
	Flächengleich bilinear	DIN EN 12512 bilinear	0,1 - 0,4 - 0,9 bilinear
mit Vorlast	6,3 mm	8,5 mm	6,5 mm
ohne Vorlast	14,7 mm	23,7 mm	14,6 mm

Demnach liegt die Fließverschiebung je nach Auswertungsmethode zwischen 6,3 mm und 23,7 mm bei Betrachtung mit und ohne Vorbelastung. Zu der Untersuchung des nichtlinearen Verhaltens wird in der Veröffentlichung von Branco, Cruz, Piazza und Varum „Modelling of timber joints in traditional structures“ [6] die nicht einheitliche Bestimmung des nichtlinearen Modells betrachtet. Dabei werden deutliche Unterschiede in der Arbeit der den Modellen zugrunde gelegten Näherungen festgestellt. Für die weitere Modellierung in dem Forschungsprojekt wurde eine trilineare Näherung gewählt. Auch Munoz, W. et al. [17] stellt die Notwendigkeit eines einheitlichen Vorgehens zur Bestimmung der Duktilität fest.

Die nach DIN EN 12512 zu bestimmende Duktilität (es wird die Verschiebeduktilität bestimmt) nimmt für die im Rahmen dieser Untersuchung betrachteten Wandscheiben mit den bestimmten Fließverschiebungen Werte zwischen 2,06 und 6,85 an. Im Sinne von DIN EN 12512 ist mit dem Begriff Duktilität die Grenzduktilität gemeint, die sich bei Versagen des Bauteils einstellt. Nach [1] ist die Verschiebeduktilität an einem Tragwerk oder Tragelement zu definieren, das durch eine oder mehrere Kräfte beansprucht wird. Sie gibt an, bis zu welchem Vielfachen der Verschiebung bei Fließbeginn das Tragwerk oder Tragelement verschoben ist.

Da die Fließverschiebung die Verschiebeduktilität beeinflusst und die Grenzverschiebung für alle Methoden gleich definiert ist, kommt es zu sehr großen Differenzen in den Angaben zur Duktilität. Die Grenzverschiebung ist durch den Abfall der Kraft innerhalb eines Zyklenkollektivs von drei Zyklen gleicher Amplitude von  $F_{\max,a}$  auf  $F_{\max,c} \leq 0,8 \cdot F_{\max,a}$  gekennzeichnet und wird in einem zyklischen Versuch bestimmt. Es zeigt sich, dass das Verfahren zur Ermittlung der Fließverschiebung im Hinblick auf die Ermittlung der Duktilität keine präzisen Angaben ohne eine subjektive Beurteilung ermöglicht. Hierzu wird nachfolgend ein im Rahmen dieser Untersuchungen entwickeltes alternatives Verfahren aufgezeigt.

Im Rahmen der hier publizierten selbst durchgeführten Untersuchungen wurde dabei die Duktilität nicht aus einer Kombination von Ergebnissen aus statischem Vorversuch und zyklischem Versuch bestimmt, sondern es wurde eine Definition gewählt, die es ermöglicht, die Duktilität aus einem zyklischen Versuch zu bestimmen. Die Duktilität aus zyklischer Beanspruchung  $D_z$  wird hier eingeführt und als der Quotient aus der Gesamtverschiebung des Druckzyklus  $v_{g,z,i}$  und der Fließverschiebung  $v_{y,z,i}$  im betrachteten Zyklus definiert.

$$D_z = \frac{v_{g,z,i}}{v_{y,z,i}} \quad (6.2)$$

mit  $v_{g,z,i} \Rightarrow$  Gesamtverschiebung des Druckzyklus i in mm  
 $v_{y,z,i} \Rightarrow$  Fließverschiebung des Druckzyklus i in mm

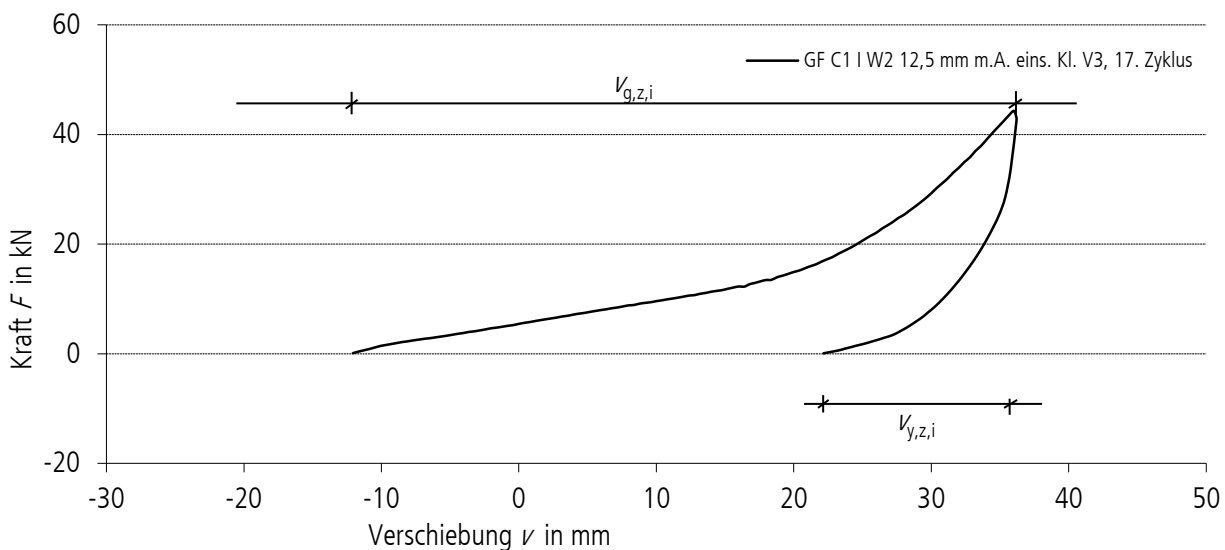


Bild 6.6 Exemplarische Darstellung der Verschiebungen  $v_{g,z,i}$  und  $v_{y,z,i}$  eines Druckhalbzzyklus einer Wandscheibe in Holztafelbauweise unter zyklischer Belastung. Dargestellt ist die Arbeitslinie eines Druckhalbzzyklus eines Versuchs an Wandscheiben mit Beplankung einer Gipsfaserplatte des Typs GF C1 I W2 der Nenndicke 12,5 mm.

Als Fließverschiebung  $u_{y,z,i}$  des Druckzyklus wird der Anteil der Verschiebung eines Halbzyklus bezeichnet, bei dem die Verschiebung ohne Aufbringen einer äußeren Kraft erfolgt (siehe Bild 6.6). Die Duktilität aus zyklischer Beanspruchung  $D_z$  ist im Verlauf der Beanspruchung inkonsistent und wird daher zu jedem Zyklus ermittelt. Um ein Abbruchkriterium für die Zunahme der Duktilität zu definieren und dem Probekörper einen Wert für die Duktilität zuzuordnen, wird die Zyklusduktilität bei Erreichen eines Abfalls der Kraft innerhalb eines Zyklenskollektivs (Zyklus a bis Zyklus c) von drei Zyklen gleicher Amplitude von  $F_{\max,a}$  auf  $F_{\max,c} \leq 0,8 \cdot F_{\max,a}$  bestimmt.

Im Rahmen der Auswertung zur Festlegung von Verhaltensbeiwerten und Überfestigkeitsfaktoren nimmt die Bestimmung der Duktilität eine untergeordnete Rolle ein. Sie ist lediglich ein Anzeiger für das Maß zur Aufnahme von Erdbebenbelastungen. Die Bestimmung der Verhaltensbeiwerte und Überfestigkeitsfaktoren wird direkt aus den gesamten Verläufen der zyklischen Versuche gewonnen.

## 6.4 Definition des Endes der zyklischen Versuche

Aufgrund der im Rahmen des Fortschritts der Untersuchungen festgestellten Anforderungen an die zu bewertenden Daten, wurden abweichend von DIN EN 12512 die Prüfungen bis zu einem Kraftabfall von 20 % der maximalen Last der Erstbelastungszyklen durchgeführt. Für zukünftige Untersuchungen wird dieses Vorgehen empfohlen. Sofern die rechnerische Bemessungs-Last nach dem zu verwendenden Bemessungskonzept bekannt ist, sollten die Versuche darüber hinaus bis zu einem Kraftabfall unter das Niveau der Bemessungs-Last fortgesetzt werden. Dies wird mit der Notwendigkeit der im Rahmen der Eingliederung in das Bemessungskonzept zu erstellenden elastisch-plastischen Hüllkurve begründet. In der hier vorliegenden Publikation wird eine Vorgehensweise zur Eingliederung der Ergebnisse in das Bemessungskonzept entwickelt (siehe Abschnitt 10). Es wird dabei der plastische Anteil bis zum Erreichen des Schnittpunkts mit der einhüllenden Kurve der zyklischen Beanspruchung fortgesetzt. Durch den Schnittpunkt wird der zu Verfügung stehende plastische Arbeitsanteil definiert. Dieser Ansatz wird im Folgenden noch genauer beschrieben und findet daher an dieser Stelle keine weitere Betrachtung.

## 6.5 Methode zur Bestimmung der Energiedissipation und Dämpfung

Die Energiedissipation (dissipierte Energie) entspricht der von der einhüllenden Kurve der Hysterese umschlossenen Fläche. Diese und die potentielle Energie werden nach DIN EN 12512 sowohl für den Druck-Halbzyklus als auch für den Zug-Halbzyklus bestimmt. Ebenfalls ist dort nachfolgende Gleichung zur Bestimmung der Dämpfung gegeben, die für einen elastischen Massenschwinger angesetzt werden kann. Bei symmetrischen Hystereseverläufen erhält man für Druck- und Zug-Halbzyklus vergleichbare Werte der Dämpfung.

$$\vartheta_{eq} = \frac{E_{d, Halb}}{2 \cdot \pi \cdot E_{p, Halb}} \quad (6.3)$$

Bei der Bestimmung der Dämpfung aus den Halbzyklen sollte darauf geachtet werden, dass die Halbzyklen im Druck- und Zugbereich gleiche Form haben.

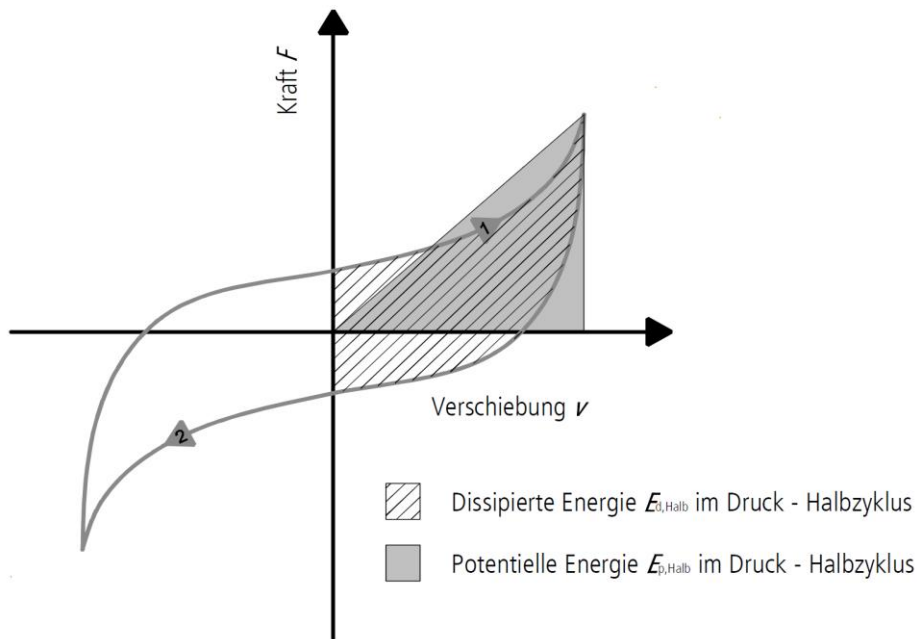


Bild 6.7 Anteile der Energie eines Zyklus nach DIN EN 12512. Die dissipierte Energie und die potentielle Energie werden im Druck-Halbzyklus bestimmt. Der Druckhalbzyklus ist mit „1“ und der Zug-Halb-Zyklus mit „2“ markiert.

Um Ungleichheiten im Druck- und Zugbereich auszugleichen oder auszuschließen, wird von dem Autor eine Betrachtung des gesamten Zyklus empfohlen. Besonders für Systeme, die sich in beiden Richtungen unter anzunehmend gleichen Steifigkeiten verformen und einen Nulldurchgang haben, ist dies zu empfehlen, um zu groß angenommene Dämpfungen zu vermeiden. Dabei sollten dennoch die Werte der Dämpfung für Zug- und Druck- Halbzyklus vergleichbare Größen haben.

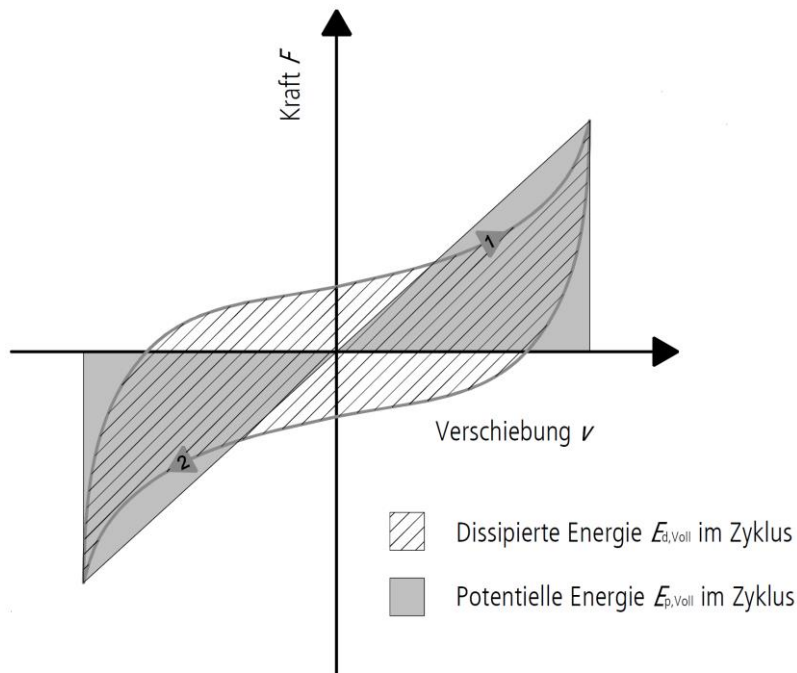


Bild 6.8 Anteile der Energie eines Zyklus bei Betrachtung des gesamten Zyklus. Die dissipierte Energie und die potentielle Energie werden bestimmt. Der Druckhalbzyklus ist mit „1“ und der Zug-Halb-Zyklus mit „2“ markiert.

Die Dämpfung wird durch die nachfolgende Gleichung am gesamten Zyklus bestimmt, wie auch von Mahrenholtz, Bachmann [9] und Chopra [8] beschrieben.

$$\vartheta_{\text{eq}} = \frac{E_{d,\text{voll}}}{2 \cdot \pi \cdot E_{p,\text{voll}}} \quad (6.4)$$

In den Untersuchungen wurden bei Betrachtung des vollen Zyklus homogenere Werte der Dämpfung bestimmt. Für die hier betrachteten Untersuchungen wurde dieses Vorgehen gewählt.

## 6.6 Kapazitätsspektrum-Methode

Mit den gewonnenen Erkenntnissen aus den zuvor beschriebenen Versuchen kann ein Nachweis der Erdbebensicherheit mit der Kapazitätsspektrum-Methode, wie von Meskouris/Hinzen [7] beschrieben, erfolgen. Der Nachweis von Bauteilen mit der Kapazitätsspektrum-Methode ist in Ländern mit hoher Erdbebenbeanspruchung eine übliche Vorgehensweise zum Nachweis der Tragfähigkeit. Das gewählte Vorgehen ist vergleichbar den Vorgaben des US-amerikanischen Standards ATC-40.

Der Nachweis nach dem Verfahren der Kapazitätsspektrum-Methode berücksichtigt nichtlineares Materialverhalten. Plastische Verformungen können somit in Kauf genommen und berücksichtigt werden. Der wesentliche Teil an dissipierter Energie beruht auf plastischen Verformungen und einem Anteil aus Reibung, der sich im Verlauf der richtungswechselnden Beanspruchung der Wand stark reduziert. Dies wird offensichtlich durch eine bleibende Schrägstellung der Wand – bei ausreichender Tragfähigkeit – nach einer zyklischen Belastung.



Bild 6.9 Wandscheibe in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus „OSB/4“ und Auflast. Erkennbar ist die bleibende Schrägstellung der Wand nach der Belastung. Quelle: VHT

Um die Nachweise nach der Kapazitätsspektrum-Methode führen zu können, müssen sowohl das Antwortspektrum als auch die Kapazitätskurve in ein Spektralbeschleunigungs-Spektralverschiebungs-Diagramm überführt werden. Die verwendeten Kapazitätskurven des Kapazitätsspektrums resultieren aus der Datenbasis der im Rahmen der hier vorliegenden Publikation durchgeführten Versuche. Dabei wurden die Kapazitätskurven aus den Hüllkurven der sich einstellenden Hysteresen entnommen.

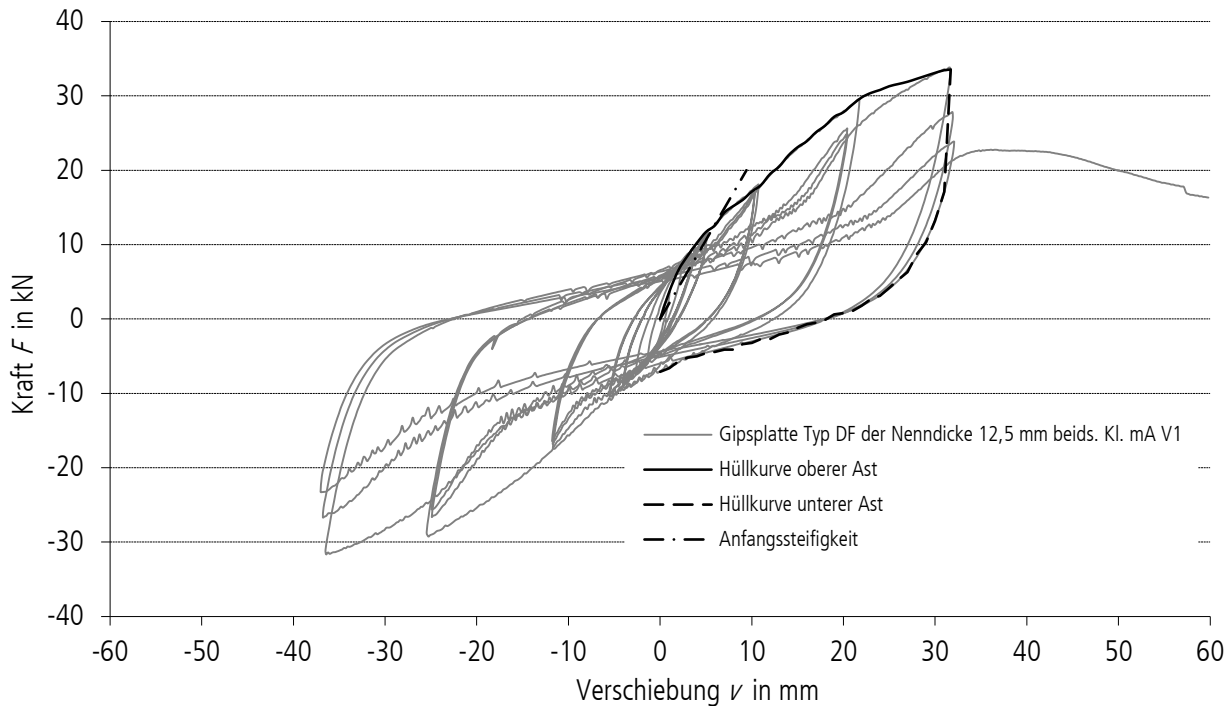


Bild 6.10 Hysteresen eines Versuchs an einer Wandscheibe in Holzrahmenbauweise mit einer beidseitigen Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DF“ der Nenndicke 12,5 mm. Auf die Wand wurde eine Auflast (mA) aufgebracht.

Die elastischen Antwortspektren nach DIN EN 1998-1-1 wurden entsprechend der in den Versuchen festgestellten mittleren Dämpfung reduziert. Zur Bestimmung der Grenzbeanspruchung wurden unterschiedliche Stufen effektiver Massen der Modalform gewählt. Bei den effektiven Massen handelt es sich um die Massen, auf die eine Beschleunigung aus einer Erdbebenbeanspruchung wirkt. Modalformen sind die Verformungsfiguren der Massenschwinger. Die Massen wurden bis zur maximalen effektiven Masse der Modalform gesteigert. Bei Erreichen der maximalen effektiven Masse der Modalform trat das Versagen der Wandscheibe ein.

Die Gebäude wurden geschossweise betrachtet. Das System der Wandscheibe in Holzrahmenbauweise ist auf eine verankerte Wandscheibe und der darüber liegenden Decke und Massen reduziert worden. Es wurde ein Einmassenschwinger gewählt, der nur eine Modalform besitzt.

In Bild 6.11 ist der obere Ast einer Hüllkurve und deren Approximation abgebildet. Die Hüllkurve ist in eine Kapazitätskurve überführt worden und in einem Spektralverschiebungs- und Spektralbeschleunigungsdiagramm eingetragen worden. In dem Diagramm sind auch das elastische Antwortspektrum sowie das gedämpfte elastische Antwortspektrum abgebildet. Das Antwortspektrum für elastisches Verhalten wird nach DIN EN 1998-1-1 mit einer Dämpfung von 5 % angenommen. Das gedämpfte elastische Antwortspektrum wird mit der aus Versuchen bestimmten mittleren Dämpfung angenommen und reduziert das elastische Antwortspektrum.

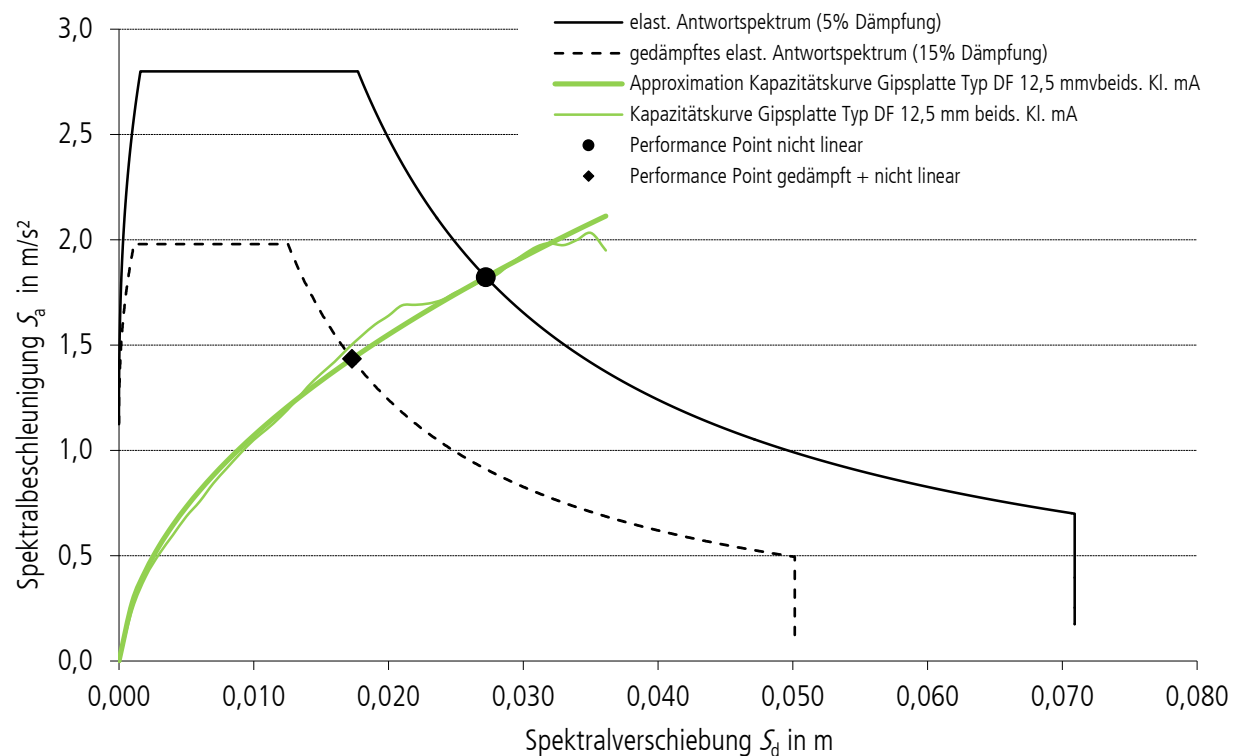


Bild 6.11 Abbildung des elastischen und des gedämpften elastischen Antwortspektrums des äquivalenten Einmassenschwingers. Ebenso abgebildet ist die Kapazitätskurve einer Wandscheibe in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DF“ der Nenndicke 12,5 mm. Eingetragen sind die „Performance Points“ für die Annahme nichtlinearen Verhaltens und gedämpften nichtlinearen Verhaltens.

Die nachfolgenden Betrachtungen in den hier durchgeführten Untersuchungen berücksichtigen jeweils das nichtlineare gedämpfte Verhalten. Mit diesem Ansatz wurde die nichtlineare Tragreserve von beplankten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise und ein höheres Maß an Dämpfung berücksichtigt. Für rein elastisches Verhalten wäre dies 5 % Dämpfung.





## 7 Erkenntnisse zum lokalen Verhalten der einschnittigen Verbindung

### 7.1 Allgemeine Erkenntnisse

Grundsätzlich konnten an der einschnittigen Verbindung der untersuchten Scherkörper folgendes Versagen bzw. folgende Schädigungen festgestellt werden. Das Versagen erfolgte nach dem in nachfolgender Skizze dargestellten Prinzip. Für die Verbindung von Gipsplatten und Holzunterkonstruktion stellten sich unter zyklischer Beanspruchung zwei Versagensmechanismen ein. Diese führten zu einer mit zunehmenden Verschiebungen fortschreitenden Schädigung der Lochwandung der Platte und Verlust der Duktilität des Verbindungsmittels (Versprödung). Je nach Kombination der untersuchten mechanischen Eigenschaften der Platten und der Verbindungsmittel wurde ein Lochleibungsversagen der Platte kombiniert mit der Ausbildung von einem Fließgelenk, der Ausbildung von zwei Fließgelenken oder Bruch des Verbindungsmittels nach wiederholtem Plastifizieren festgestellt.

Nachfolgend ist eine schematische Darstellung zum Verschiebungsablauf der Verbindung abgebildet. Dabei wird zwischen der Ausbildung von einem und zwei Fließgelenken (rote Markierung) unterschieden. Im oberen Teil der Abbildung bildet sich ein Fließgelenk aus und es tritt ebenfalls Lochleibungsversagen in der Platte ein. Der untere Teil der Abbildung zeigt die Ausbildung von zwei Fließgelenken als maximal duktiles Verhalten der einschnittigen Verbindung von gipsgebundenem Plattenwerkstoff und Holzunterkonstruktion.

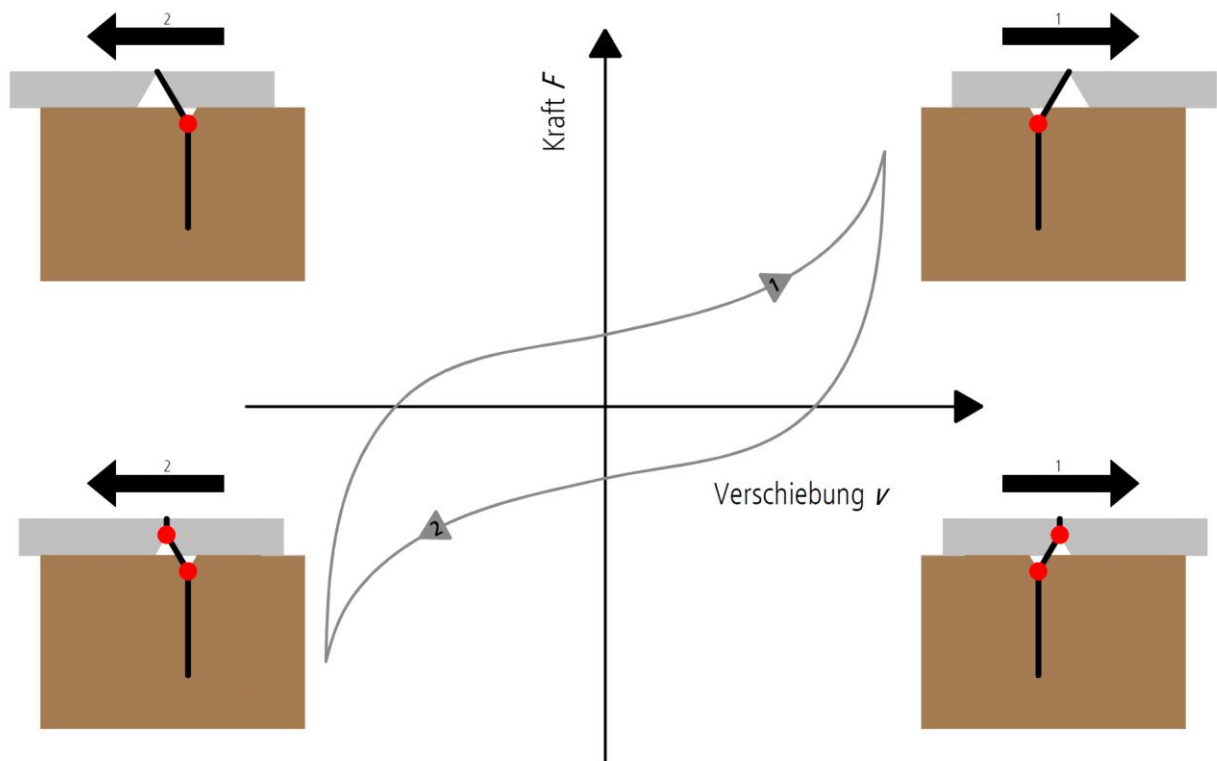


Bild 7.1 Verhalten der einschnittigen Verbindung von Gipsplatten und Holzunterkonstruktion mit Ausbildung von einem Fließgelenk (rote Markierung) und Lochleibungsversagen (oberer Bildabschnitt) sowie Ausbildung von zwei Fließgelenken (unterer Bildabschnitt). Die zyklische Beanspruchung der Verbindung durch erzwungene Verschiebungen ist im Zentrum der Abbildung dargestellt. Es werden der Druckhalbzyklus (1) und der Zughalbzyklus (2) unterschieden. Rot markiert sind die Stellen der Verbindungsmittel, an denen Fließgelenke auftreten.

Für die Verbindung der Gipsplatten mit der Holzunterkonstruktion wurden Klammern mit einem Durchmesser 1,5 mm verwendet. Aufgrund des geringen Durchmessers ist ein vergleichsweise niedriges Fließmoment vorhanden, welches ein frühzeitiges Plastizieren des Verbindungsmittels im Vergleich zu Verbindungsmitteln mit größerem Durchmesser zulässt. Dieses Plastizieren ist im Sinne duktiler Eigenschaften als positiv zu bewerten. Auch [27] kommt nach der Untersuchung von stiftförmigen Verbindungsmitteln zu dem Schluss, dass Klammern ein hohes Maß an Energiedissipationsvermögen besitzen. Ein Bezug zur Johansen Theorie wird von [27] dabei allerdings nicht hergestellt.

Im Vorfeld der Untersuchungen wurden die Versagensformen der einschnittigen Verbindung und die rechnerisch aufnehmbaren Scherkräfte nach DIN EN 1995-1-1, Abschnitt 8.2.2 Gleichung (8.6) bestimmt. Dabei wurde auch die rechnerisch anzunehmende Anzahl an Fließgelenken bestimmt, die sich beim Versagen der Verbindung ausbilden. Die verwendeten Gleichungen auf Basis der Johansen-Theorie [12] der einschnittigen Verbindung lauten wie folgt:

$$F_{f,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{ll} f_{h,1k} \cdot t_1 \cdot d & (7.1) \text{ Gl. 1} \\ f_{h,2k} \cdot t_2 \cdot d & (7.1) \text{ Gl. 2} \\ \frac{f_{h,1k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[ \sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] & (7.1) \text{ Gl. 3} \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1k} \cdot t_1^2 \cdot d}} - \beta \right] & (7.1) \text{ Gl. 4} \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \cdot \left[ \sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1k} \cdot t_2^2 \cdot d}} - \beta \right] & (7.1) \text{ Gl. 5} \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1k} \cdot d} & (7.1) \text{ Gl. 6} \end{array} \right.$$

mit:

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (7.2)$$

Tabelle 7.1.1 Verhalten der einschnittigen Verbindung von Beplankungen aus Gipsplatten nach DIN EN 520 und Holzunterkonstruktion mit einer charakteristischen Rohdichte  $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ . Charakteristische Werte der Abschertragfähigkeit der einschnittigen Verbindung.

	Gipsplatte: Typ und Nenndicke					
	DF 12,5 mm	DF 18,0 mm	DEFH1IR 12,5 mm	DEFH1IR 15,0 mm	DFH2IR 12,5 mm	DFH2IR 15,0 mm
Char. Abschertragfähigkeit $F_{t,Rk}$	361 N	479 N	590 N	573 N	529 N	566 N
Maßgebende Gleichung nach (7.1)	Gl. 4	Gl. 4	Gl. 6	Gl. 6	Gl. 4	Gl. 6
Anzahl Fließgelenke	1	1	2	2	1	2

Bei Bestimmung der rechnerischen Abscherwiderstände nach DIN EN 1995-1-1, Gleichung (8.6) für Verbindungen von Gipsplatten nach DIN EN 520, Typ „DEFH11R“ und Holzunterkonstruktion ist anzumerken, dass sich die rechnerischen Abscherwiderstände nach Gleichung 4 (1 Fließgelenk) und Gleichung 6 (2 Fließgelenke) nur geringfügig unterscheiden.

Tabelle 7.1.2 Verhalten der einschnittigen Verbindung von Beplankungen aus Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2 und Holzunterkonstruktion. Charakteristische Werte der Abschertragfähigkeit der einschnittigen Verbindung.

	Gipsfaserplatte: Typ und Nenndicke					
	GF-W2 12,5 mm	GF-W2 15,0 mm	GF-C1-I-W2 12,5 mm	GF-C1-I-W2 15,0 mm	GF-I-W2-C1 12,5 mm	GF-I-W2-C1 15,0 mm
Char. Abschertragfähigkeit $F_{t,Rk}$	587 N	589 N	662 N	662 N	609 N	625 N
Maßgebende Gleichung nach (7.1)	Gl. 6	Gl. 6	Gl. 6	Gl. 6	Gl. 6	Gl. 6
Anzahl Fließgelenke	2	2	2	2	2	2

An den zyklisch beanspruchten Scherkörpern wurden nach dem Versuch die Verbindungen von Gipsplatte und Holzunterkonstruktion geöffnet. Ziel dabei war, die Versagensmechanismen nach Johansen-Theorie zu identifizieren. Anhand der vorgefundenen Versagenszustände konnte die Anzahl aufgetretener Fließgelenke bestimmt werden. Nachfolgend sind die beiden maßgebenden an Scherkörpern vorgefundenen Versagensformen der einschnittigen Verbindung nach Johansen-Theorie abgebildet. Dabei konnten sowohl Versagen nach Gleichung 4 (Lochleibungsversagen der Gipsplatte kombiniert mit der Ausbildung von einem Fließgelenk) als auch Versagen nach Gleichung 6 (Ausbildung von 2 Fließgelenken) festgestellt werden.



Bild 7.2 Versagen der einschnittigen Verbindung von Gipsplatte und Holzunterkonstruktion. Es handelt sich um Versagen nach DIN EN 1995-1-1, (8.6), Gleichung 4 mit Lochleibungsversagen der Gipsplatte und Ausbildung eines Fließgelenks am Verbindungsmittel. Der Bereich des Fließgelenks ist rot markiert. Quelle: VHT

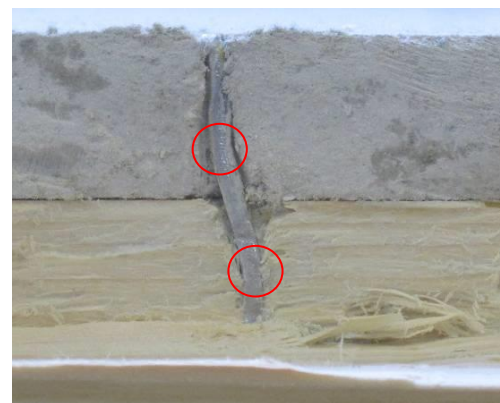


Bild 7.3 Versagen der einschnittigen Verbindung von Gipsfaserplatte und Holzunterkonstruktion. Es handelt sich um Versagen nach DIN EN 1995-1-1, (8.6), Gleichung 6 mit Ausbildung von zwei Fließgelenken am Verbindungsmittel. Die Bereiche der Fließgelenke sind rot markiert. Quelle: VHT

Nachfolgend sind die beiden Last-Verschiebungskurven der zyklischen Prüfungen an Scherkörpern abgebildet. Bei der in Bild 7.4 abgebildeten Hysteresekurve handelt es sich um Versagen der Verbindung mit Lochleibungsversagen und Ausbildung eines Fließgelenks am Verbindungsmittel. Die in Bild 7.5 abgebildete Hysteresekurve zeigt Versagen der Verbindung mit Ausbildung von zwei Fließgelenken am Verbindungsmittel. Das Verbindungsmittel ist in beiden Versuchen gleich.

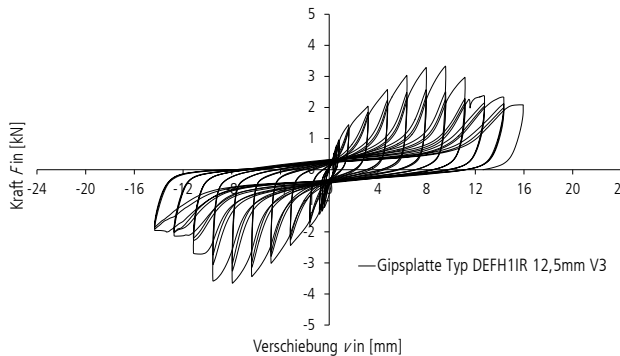


Bild 7.4 Typische Hysteresekurve einer zyklisch beanspruchten Gipsplatte nach DIN EN 520 mit definierter Rohdichte und Ausbildung eines Fließgelenks.

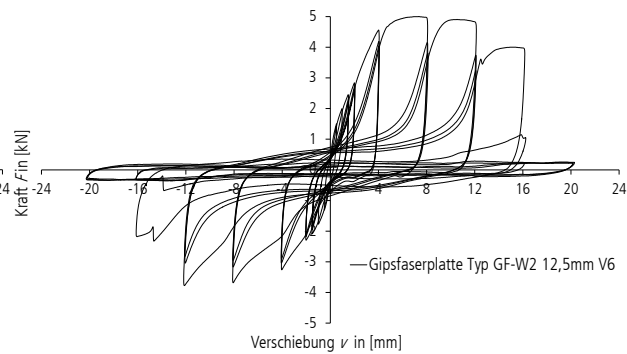


Bild 7.5 Typische Hysteresekurve einer zyklisch beanspruchten Gipsfaserplatte nach DIN EN 15283-2 und Ausbildung von zwei Fließgelenken.

Beide Hysteresekurven zeigen für die Zyklen der Erstbelastung eine bauchige konvexe Form. Die Zyklen der Wiederbelastung sind eingeschnürt. Von [29] wird dieses Verhalten ebenfalls für Verbindungen von Spanplatten und Holzunterkonstruktion beschrieben. Der Verlauf der Hysteresekurve von Proben an gipsgebundenen Plattenwerkstoffen mit Holzunterkonstruktion und Proben an Spanplatten mit Holzunterkonstruktion sind demnach vergleichbar. Der signifikante Unterschied zwischen Erst- und Wiederbelastungszyklen deutet auf eine irreversible Schädigung bei Erstbelastung hin. Diese wird in den folgenden Abschnitten näher betrachtet.

## 7.2 Charakterisierung des Verhaltens der einschnittigen Verbindung unter zyklischer Beanspruchung

Zur Beurteilung der Hysteresekurven wurde die einhüllende Kurve bestimmt. Dabei wurden alle Hystereseschleifen durch die einhüllende Kurve eingeschlossen. Die Kurven von Gipsplatten (Bild 7.4) und Gipsfaserplatten (Bild 7.5) unterschieden sich maßgeblich durch den Verlauf der Einhüllenden. Als Maß für die einhüllende Kurve wurde deren Flächeninhalt bestimmt.

Als Abbruchkriterium zur Auswertung der Eigenschaften wurde ein Kraftabfall größer 20 % innerhalb eines Zyklenkollektivs von 3 Zyklen gleicher Verschiebung definiert. Diese Bedingungen finden sich auch in DIN EN 1998-1 für die Beurteilung von Holzkonstruktionen.

Die charakteristische Form der Hysteresen zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen dem ersten Zyklus des Zyklenkollektivs gleicher Verschiebungsamplituden und dem 2. bzw. 3. Zyklus des Zyklenkollektivs gleicher Verschiebungen. Auch die dissipierte Energie (siehe Abschnitt 6.5) im 2. und 3. Zyklus eines Zyklenkollektivs gleicher Amplituden war geringer.

Dabei war festzustellen, dass im 1. Zyklus eines Zyklenkollektivs gleicher Verschiebungsamplituden etwa die doppelte Energie dissipiert wurde. Im 2. und 3. Zyklus eines Kollektivs verliefen die Hysteresen flacher (nahezu linear) und lediglich zum Ende der maximalen Amplitude stieg die Reaktionskraft stark an. Der Verlauf des Anstiegs war dabei konkav gekrümmt. Im Gegensatz dazu war der Anstieg im 1. Zyklus eines Kollektivs vor dem Erreichen der maximalen Verschiebungsamplitude konvex gekrümmt.

Dabei wurden drei wesentliche Mechanismen identifiziert, durch die Energie dissipiert wurde:

- Plastische Deformationen im Bereich der Lochwandung, die nicht reversibel waren.
- Plastische Verformungen durch Ausbildung von Fließgelenken am Verbindungsmittel.
- Flächige Reibung zwischen Beplankung und Unterkonstruktion (Hier wird vermutet, dass dieses nur einen geringen Anteil an der Gesamtenergie-dissipation hat, da es im Verlauf der zyklischen Beanspruchung zum Abheben (Lockerung der Verbindung, Herausziehen des Verbindungsmittels) der Platten von der Unterkonstruktion kam.

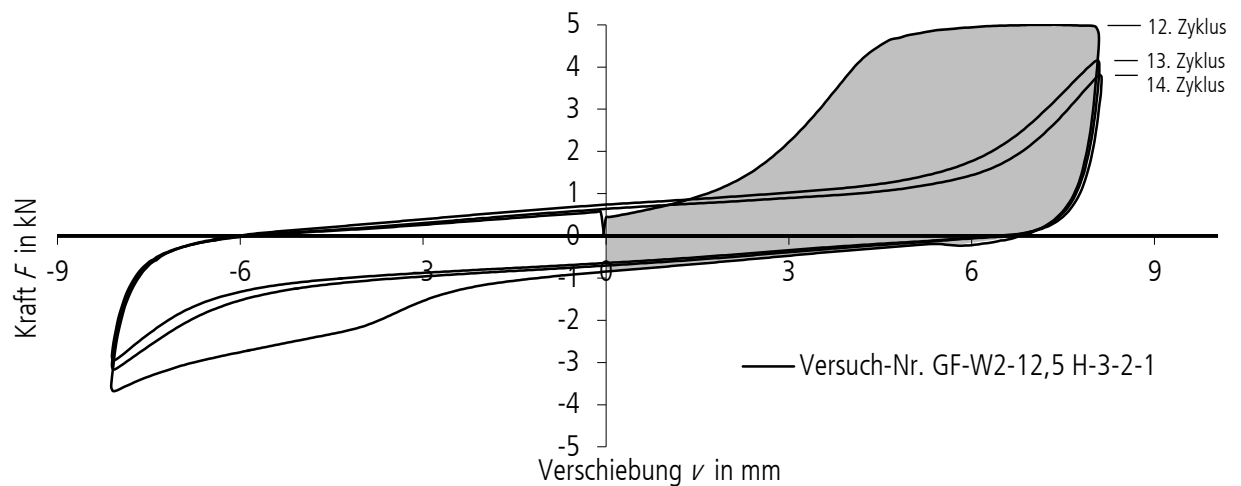


Bild 7.6 Hysteresekurve eines Zyklenskollektivs bestehend aus drei Zyklen gleicher Verschiebungsamplituden. Abgebildet ist das Zyklenskollektiv mit Verschiebungsamplituden von +8,0 mm / -8,0 mm. Im gesamten Versuchsablauf handelt es sich um den 12. bis 14. Zyklus. Grau hinterlegt ist die eingeschlossene Fläche des Druckhalbzyklus des 1. Zykels eines Zyklenskollektivs gleicher Verschiebungsamplituden.

Aufgrund der zuvor genannten drei Einflüsse werden diese nun im Hinblick auf den Verlauf der Hysterese innerhalb eines Kollektivs quantifiziert und nachfolgende Hypothese zum Beitrag der einzelnen Einflüsse auf die Gesamt-Energiedissipation aufgestellt:

1. Die dissipierte Energie der 1. Zyklen eines Kollektivs setzt sich aus der Energiedissipation durch plastische Deformation des Plattenwerkstoffs in der Lochwandung und dem Ausbilden von Fließgelenken am Verbindungsmittel sowie aus Reibung zusammen. Beim ersten Zyklus eines Kollektivs ist die vergrößerte Verschiebungsamplitude der Hysterese eine Erstbelastung.

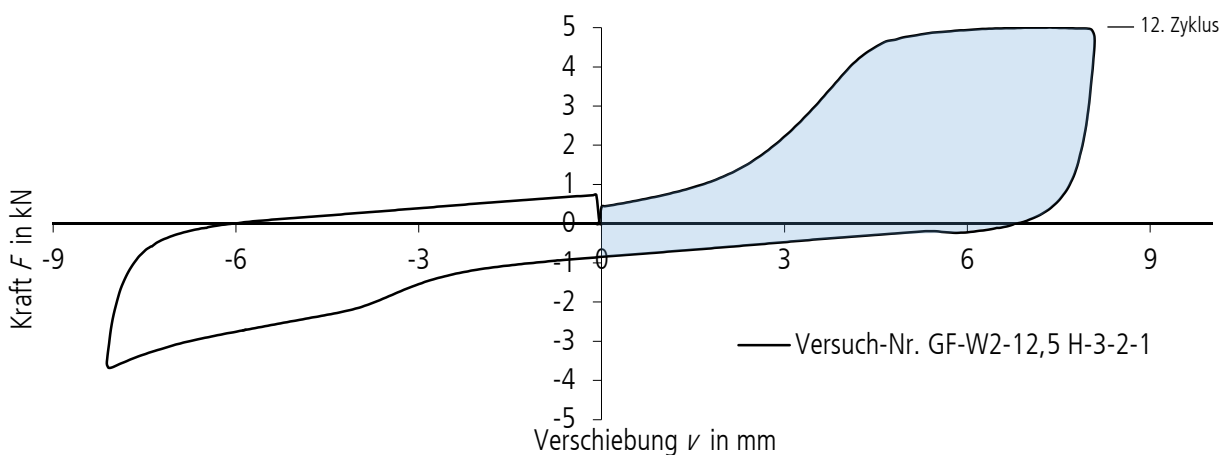


Bild 7.7 Hysteresekurve des 1. Zyklus eines Zyklenkollektivs bestehend aus drei Zyklen gleicher Verschiebungsamplituden. Die Verschiebungsamplituden betragen +8,0 mm / -8,0 mm. Im gesamten Versuchsablauf handelt es sich um den 12. Zyklus. Die blau hinterlegte Fläche des Druckhalbzyklus des 1. Zyklus eines Zyklenkollektivs gleicher Verschiebungsamplituden hat einen Energiegehalt von 27.675 Nmm.

2. In den 2. Zyklen eines Kollektivs gleicher Verschiebungsamplituden ist die plastische Deformation der Lochwandung der Platte abgeschlossen. Da diese nicht reversibel ist, ist der Anteil an Energiedissipation nicht erneut aktivierbar. Zur Energiedissipation tragen die Ausbildung von Fließgelenken am Verbindungsmittel und die Reibung zwischen Plattenwerkstoff und Unterkonstruktion bei.

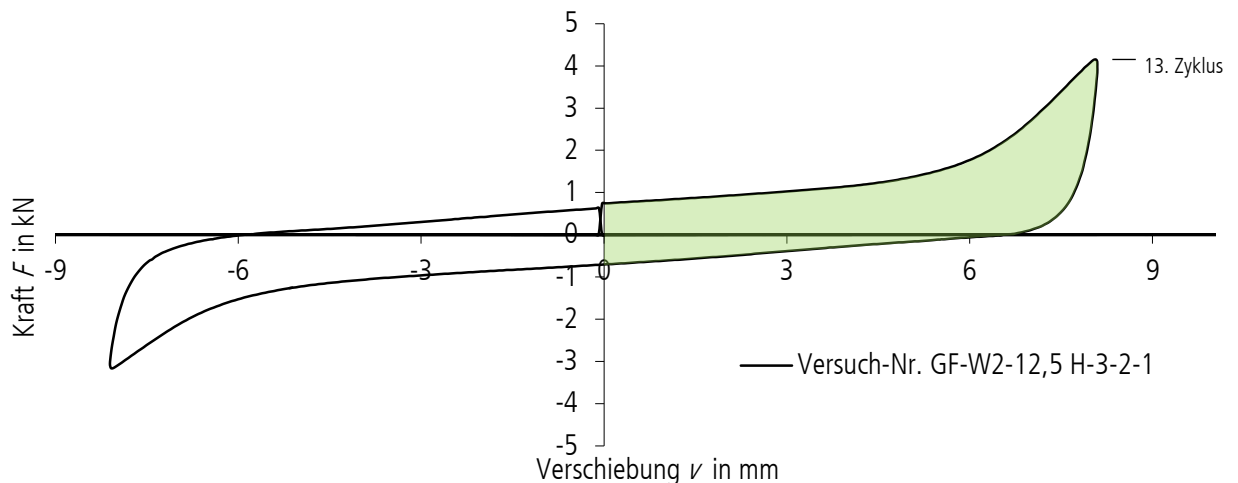


Bild 7.8 Hysteresekurve des 2. Zyklus eines Zyklenkollektivs bestehend aus drei Zyklen gleicher Verschiebungsamplituden. Die Verschiebungsamplituden betragen +8,0 mm / -8,0 mm. Im gesamten Versuchsablauf handelt es sich um den 13. Zyklus. Die grün hinterlegte Fläche des Druckhalbzyklus des 2. Zyklus eines Zyklenkollektivs gleicher Verschiebungsamplituden hat einen Energiegehalt von 13.706 Nmm.

3. Innerhalb der 3. Zyklen eines Zyklenkollektivs findet die Energiedissipation durch die Ausbildung von Fließgelenken am Verbindungsmittel statt. Ein Beitrag zur Energiedissipation durch Reibung wird als vernachlässigbar angesehen, da sich die Platten erkennbar von der Unterkonstruktion abheben.

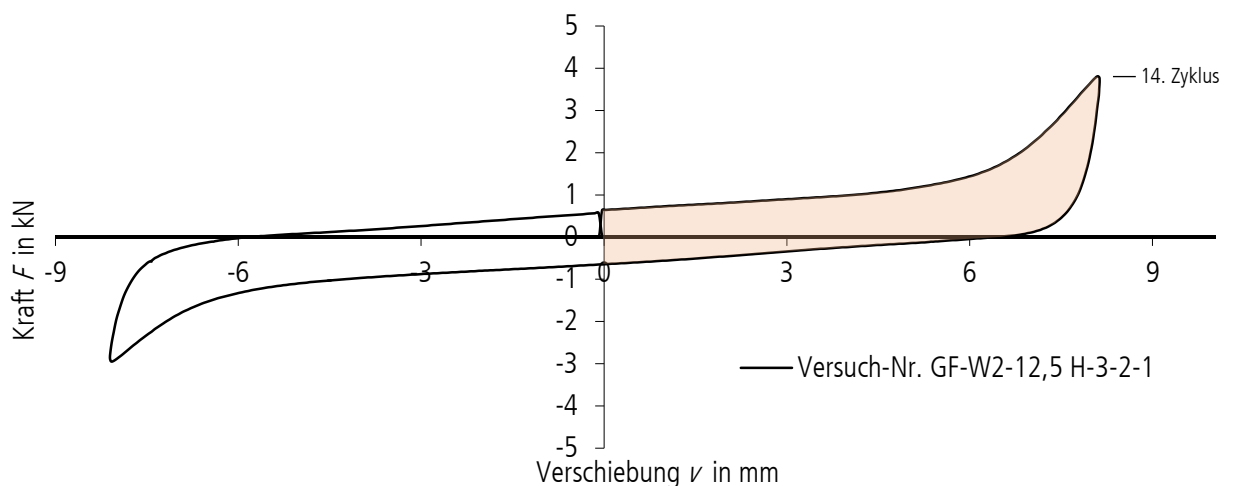


Bild 7.9 Hysteresekurve des 3. Zyklus eines Zyklenkollektivs bestehend aus drei Zyklen gleicher Verschiebungsamplituden. Die Verschiebungsamplituden betragen +8,0 mm / -8,0 mm. Im gesamten Versuchsablauf handelt es sich um den 14. Zyklus. Die orange hinterlegte Fläche des Druckhalbzyklus des 3. Zyklus eines Zyklenkollektivs gleicher Verschiebungsamplituden hat einen Energiegehalt von 11.769 Nmm.

Nachfolgend werden die zyklischen Prüfungen an verschiedenen gipsgebundenen Werkstoffen hinsichtlich der Anteile an erbrachter Energiedissipation zerlegt. Dabei werden Energiedissipation aus plastischer Deformation der Lochwandung, Ausbildung von Fließgelenken am Verbindungsmittel und Reibung zwischen Plattenwerkstoff und Holzunterkonstruktion unterschieden.

Um den Beitrag der einzelnen Anteile zur Energiedissipation aus verschiedenen Versuchsreihen gegenüberstellen zu können, wurde die Energiedissipation je Verschiebung innerhalb des Zyklus betrachtet. Dabei wird zwischen Erstverschiebung und Gesamtverschiebung wie folgt differenziert:

- Erstverschiebung wirkt auf die Lochwandung und verformt diese plastisch.
- Gesamtverschiebung wirkt auf das Verbindungsmittel und die Reibung.

Nachfolgend ist die Verteilung der Anteile exemplarisch an einer Gipsfaserplatte des Typs GF-W2 der Nenndicke 12,5 mm tabellarisch zusammengestellt.

Tabelle 7.2.1 Verteilung der Beiträge zur Energiedissipation bezogen auf die Verschiebung - am Beispiel einer Gipsfaserplatte des Typs GF-W2 der Nenndicke 12,5 mm.

	mittlere Gesamt-Energiedissipation des Zyklus [Nmm]	Erstverschiebung [mm]	Gesamtverschiebung [mm]	Energiedissipation aus Lochwandung innerhalb des Zyklenskollektivs		Energiedissipation aus Verbindungsmittel innerhalb des Zyklenskollektivs		Energiedissipation aus Reibung innerhalb des Zyklenskollektivs	
				bezogen auf die Erstverschiebung in Nmm/mm	Gewichtung der bezogenen Energiedissipation	bezogen auf die Gesamt- verschiebung in Nmm/mm	Gewichtung der bezogenen Energiedissipation	bezogen auf die Gesamt- verschiebung in Nmm/mm	Gewichtung der bezogenen Energiedissipation
3. Zyklus	4.184	0,5	1,5	768	768	3.054	509	362	60
4. Zyklus	3.416		1,5	0	57,4%	3.054	38,1%	362	4,5%
5. Zyklus	3.054		1,5	0		3.054		0	
6. Zyklus	5.338	0,5	2,0	654	654	4.332	542	352	44
7. Zyklus	4.685		2,0	0	52,7%	4.332	43,7%	352	3,6%
8. Zyklus	4.332		2,0	0		4.332		0	
9. Zyklus	17.540	2,0	4,0	4.965	1.241	10.265	642	2.311	144
10. Zyklus	12.575		4,0	0	61,2%	10.265	31,6%	2.311	7,1%
11. Zyklus	10.265		4,0	0		10.265		0	
12. Zyklus	44.295	4,0	8,0	20.132	2.517	20.169	630	3.994	125
13. Zyklus	24.163		8,0	0	76,9%	20.169	19,3%	3.994	3,8%
14. Zyklus	20.169		8,0	0		20.169		0	
Summe/Anteil	154.018			26.518		113.462		14.038	
mittlere Anteile der bezogenen Energiedissipation				<b>62,1%</b>		<b>33,2%</b>		<b>4,8%</b>	



Nach diesem Schema wurden verschiedene Versuche an Scherkörpern ausgewertet. Nachfolgend werden die mittleren Anteile der Energiedissipation in Abhängigkeit von der Verschiebung gegenübergestellt.

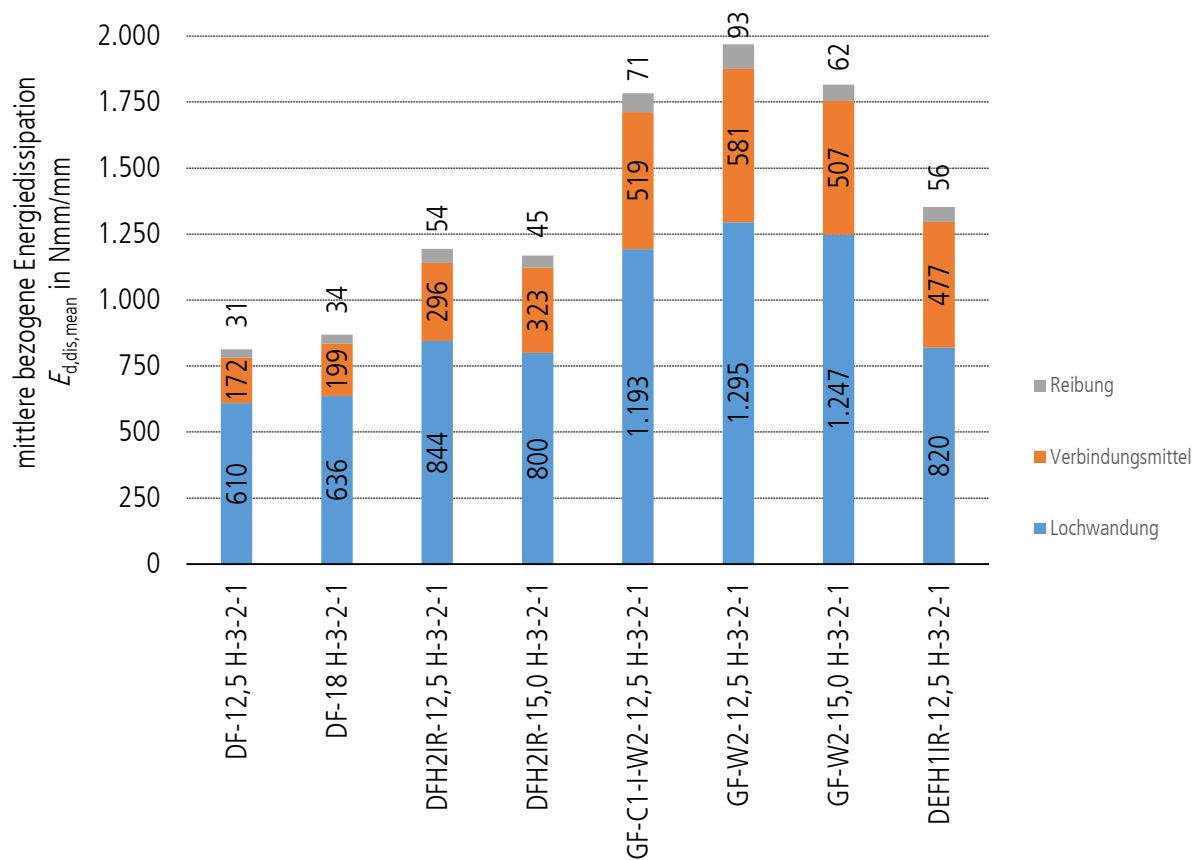


Bild 7.10 Vergleich der mittleren bezogenen Energiedissipation  $E_{d,dis,mean}$  von Scherkörpern mit Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen. Die Abbildung unterteilt die mittlere bezogene Energiedissipation in die Anteile aus Reibung, Verbindungsmittel und Lochwandung.

In Bild 7.10 ist ein signifikanter Unterschied in der Größe der mittleren bezogenen Energiedissipation zwischen Gipsplatten und Gipsfaserplatten erkennbar. Die auf der rechten Seite des Diagramms abgebildeten Gipsplatten des Typs „DEFH1IR 12,5 mm“ dissipierten Energie in der Größenordnung einer Gipsfaserplatte. Diese Gipsplatten verfügen über einen Zuschlag an Hartholzgranulat im Gipskern. Es ist davon auszugehen, dass dieser Hartholzgranulat-Zuschlag die Eigenschaften der Platte hier maßgeblich verbessert.

An geöffneten Proben konnte sowohl bei den Gipsfaserplatten als auch bei der Gipsplatte mit Hartholzgranulat ein Versagen der Verbindung mit Ausbildung von zwei Fließgelenken am Verbindungsmittel beobachtet werden. Die Änderung des Versagensmechanismus der Verbindung (zwei Fließgelenke) ist gekoppelt an eine Erhöhung der Rohdichte der Platten. Die Erhöhung der Rohdichte von gipsgebundenen Platten führt gleichzeitig zu einer Erhöhung der Lochleibungsfestigkeit (siehe [11]). Mit höherer Lochleibungsfestigkeit wird bei der plastischen Deformation der Lochwandung mehr Energie dissipiert. Zyklische Untersuchungen an Probekörpern zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit haben gezeigt, dass durch die wiederholte Beanspruchung der Lochwandung die Randzonen der Lochwandung zunehmend verdichtet werden. Dabei werden die Porenräume der gipsgebundenen Platte verdichtet (siehe Bild 7.11).

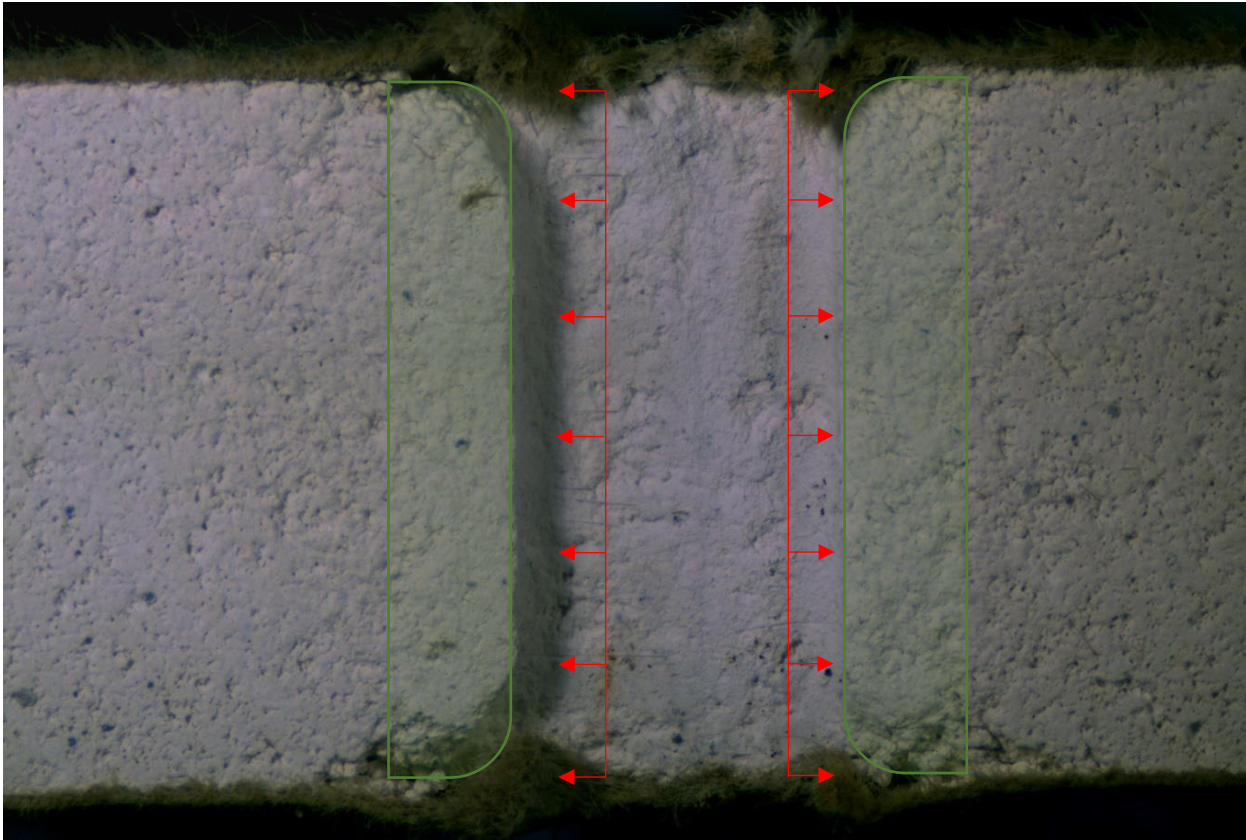


Bild 7.11 Geschnittener Probekörper eines zyklischen Lochleibungs-Versuchs. Abgebildet ist eine Aufnahme der Schnittfläche eines ausgeweiteten Loches einer Gipsplatte des Typs DF der Nenndicke 12,5 mm nach zyklischer Beanspruchung. Rot markiert sind die Lastrichtungen, mit der die Lochwandung beansprucht wurde. In den grün umschlossenen Bereichen ist eine Verdichtung der Gipsmatrix im Vergleich zu den weiter vom Lochwandungsrand entfernten Bereichen erkennbar. Dies zeigt sich durch eine geringere Anzahl an Poren.

Betrachtet man nun die reinen Anteile der mittleren bezogenen Energiedissipation (siehe Bild 7.12), so ist festzustellen, dass sich der Anteil des Verbindungsmittels beim Übergang von der Ausbildung von einem Fließgelenk zu zwei Fließgelenken stark vergrößert und der Anteil der Lochwandung abnimmt. Der Anteil der Reibung zeigt im betrachteten Untersuchungsumfang keine signifikanten Unterschiede. Daraus ist zu schlussfolgern, dass eine Veränderung hin zur Ausbildung von zwei Fließgelenken am Verbindungsmittel einen stärkeren Effekt auf das Vermögen Energie zu dissipieren hat als die Erhöhung der Lochleibungsfestigkeit. Die Ausbildung von zwei Fließgelenken kann durch die Wahl einer Platte gleichen Typs jedoch mit größerer Nenndicke (siehe Bild 7.12) herbeigeführt werden.

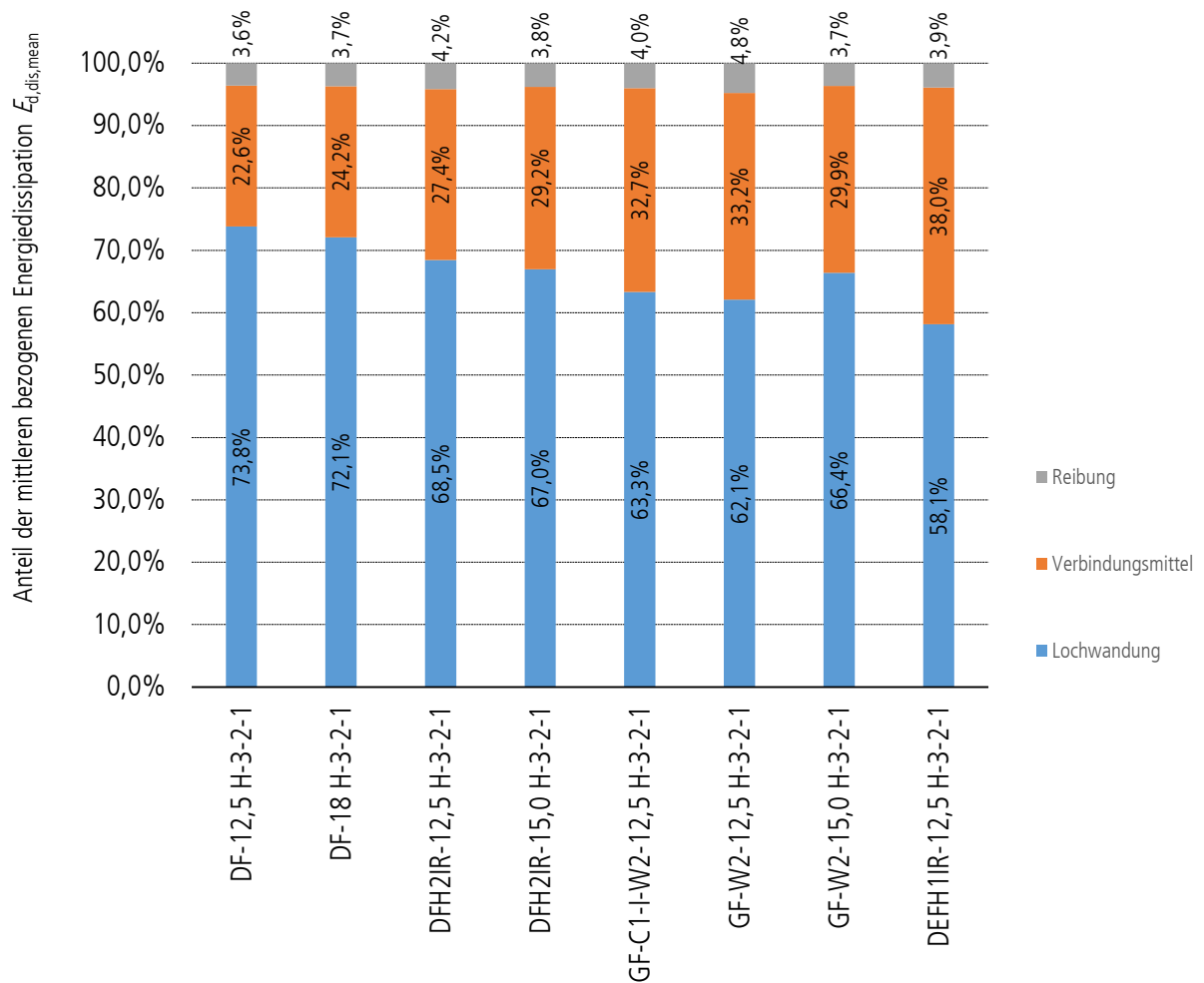


Bild 7.12 Vergleich der Anteile der mittleren bezogenen Energiedissipation  $E_{d,dis,mean}$  von Scherkörpern mit verschiedener Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen. Die Abbildung unterteilt die Anteile der mittleren bezogenen Energiedissipation in die Anteile aus Reibung, Verbindungsmittel und Lochwandung.

Im folgenden Abschnitt wird die mittlere bezogene Energiedissipation in Abhängigkeit von der charakteristischen Lochleibungsfestigkeit betrachtet (siehe Bild 7.13). Die Lochleibungsfestigkeit ist bei gipsgebundenen Werkstoffen maßgeblich von der Rohdichte der Platten abhängig. Die Lochleibungsfestigkeit hat weiterhin maßgeblichen Einfluss auf die Anzahl an Fließgelenken, die in einer Verbindung entstehen.

Es ist zu erwarten, dass mit zunehmender Lochleibungsfestigkeit die Energiedissipation ansteigt, verbunden mit einer Zunahme des Anstiegs nach dem Übergang von der Ausbildung von einem Fließgelenk zur Ausbildung von zwei Fließgelenken. Dazu wird nachfolgend die Grenzlochleibungskraft am Übergang von der Ausbildung eines Fließgelenks zur Ausbildung zweier Fließgelenke rechnerisch bestimmt.

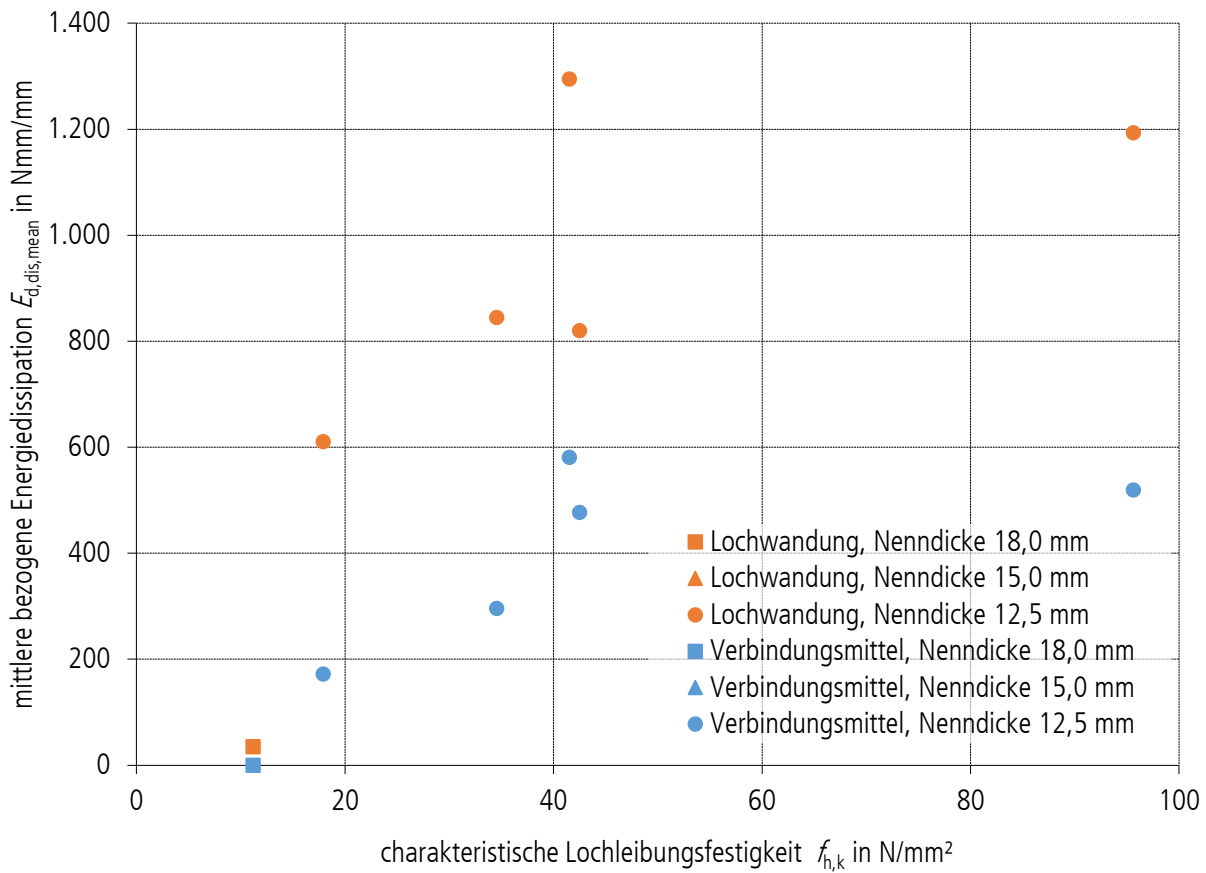


Bild 7.13 Abgebildet ist die mittlere bezogene Energiedissipation in Abhängigkeit der rechnerischen Lochleibungs-  
festigkeit der betrachteten gipsgebundenen Plattenwerkstoffe unterschiedlicher Nenndicken. Das Dia-  
gramm zeigt die mittlere Energiedissipation bezogen auf die Verschiebung. Es wird zwischen Energie-  
dissipation aus dem Verbindungsmittel (blau) und der Deformation der Lochwandung (orange) unter-  
schieden.

Die Grenzlochleibungsfestigkeiten wurden nach DIN EN 1995-1-1, Abschnitt 8.2.2 Gleichung (8.6) aus den sechs Gleichungen anhand der Schnittpunkte der einzelnen geringsten Versagenskriterien und für die Plattendicken 12,5 mm, 15,0 mm und 18,0 mm bestimmt. Als Verbindungsmittel wurden die in den experimentellen Untersuchungen verwendeten Klammern mit Durchmesser 1,5 mm zu Grunde gelegt. Das Fließmoment  $M_{y,Rk}$  der Klammern beträgt rechnerisch je Schenkel der Klammer 689 Nmm.

Die Schnittpunkte wurden iterativ aus den Gleichungen 1 und 4 sowie den Gleichungen 4 und 6 bestimmt.

Gleichung 1: 
$$F_{f,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (7.3)$$

Gleichung 4: 
$$F_{f,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left( \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right) \quad (7.4)$$

Gleichung 6: 
$$F_{f,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \quad (7.5)$$

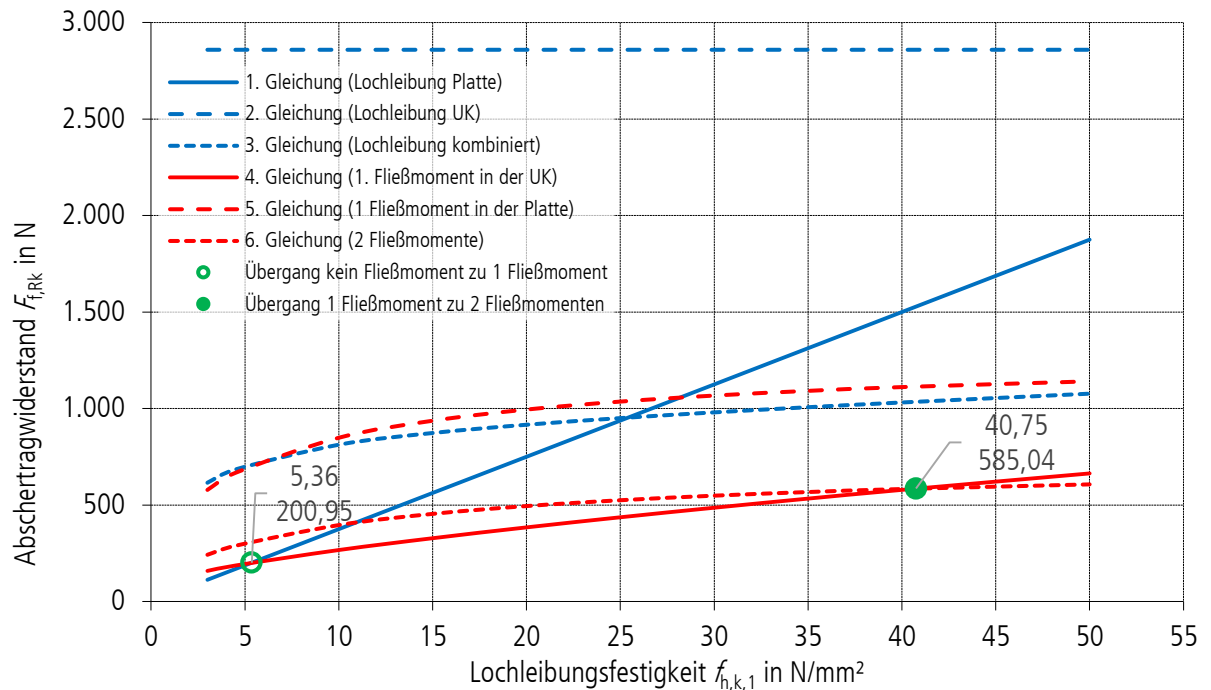


Bild 7.14 Abschertragfähigkeit nach DIN EN 1995-1-1, Gleichung (8.6) für die einschnittige Verbindung in Abhängigkeit von der rechnerischen Lochleibungsfestigkeit der betrachteten gipsgebundenen Plattenwerkstoffe. Konstant ist die Nenndicke  $t = 12,5$  mm der Platte und das Fließmoment  $M_{y,Rk} = 689$  Nmm der Klammer. Das Diagramm zeigt die Gleichungen der sechs verschiedenen Versagensformen. Maßgebend ist der geringste Abschertragwiderstand.

Der Schnittpunkt zur Ausbildung eines Fließgelenks der einschnittigen Verbindung liegt bei einer Plattendicke von 12,5 mm bei 5,36 N/mm². Diese Mindest-Lochleibungsfestigkeit erreichen alle untersuchten gipsgebundenen Plattenwerkstoffe. Mit zunehmender Plattendicke sinkt der Mindestwert der Lochleibungsfestigkeit zur Ausbildung eines Fließgelenks.

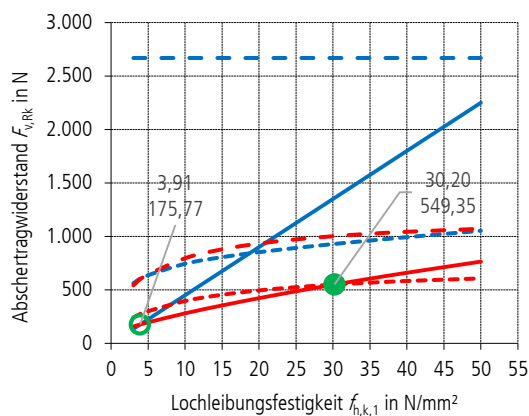


Bild 7.15 Abschertragfähigkeit wie in Bild 7.14, jedoch für die Nenndicke  $t = 15,0$  mm.

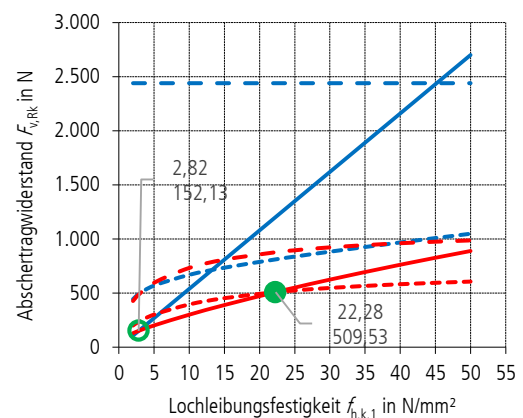


Bild 7.16 Abschertragfähigkeit wie in Bild 7.14, jedoch für die Nenndicke  $t = 18,0$  mm.

Für Platten verschiedener Nenndicke ergeben sich folgende Grenzwerte hinsichtlich der Anzahl ausgebildeter Fließgelenke am Verbindungsmittel:

Tabelle 7.2.2 Mindestwerte der Lochleibungsfestigkeit  $f_{h,k}$  in N/mm<sup>2</sup> zur Ausbildung von Fließgelenken von Platten unterschiedlicher Nenndicke der untersuchten einschnittigen Verbindung (Klammerdurchmesser  $d = 1,5$  mm).

Nenndicke $t$	1 Fließgelenk	2 Fließgelenke
12,5 mm	5,36	40,75
15,0 mm	3,91	30,20
18,0 mm	2,82	22,28

Für die Ausbildung von zwei Fließgelenken der einschnittigen Verbindung muss bei einer Plattendicke von 12,5 mm eine Mindest-Lochleibungsfestigkeit von 40,75 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. Diese Lochleibungsfestigkeit wird rechnerisch lediglich von Gipsfaserplatten und Gipsplatten mit einem Zuschlag aus Hartholzgranulat erreicht. Mit zunehmender Plattendicke reduziert sich der Mindestwert der Lochleibungsfestigkeit zur Ausbildung von zwei Fließgelenken. Nachfolgend sind die Mindestwerte zur Ausbildung von zwei Fließgelenken entsprechend den Plattendicken in Bild 7.13 eingetragen.

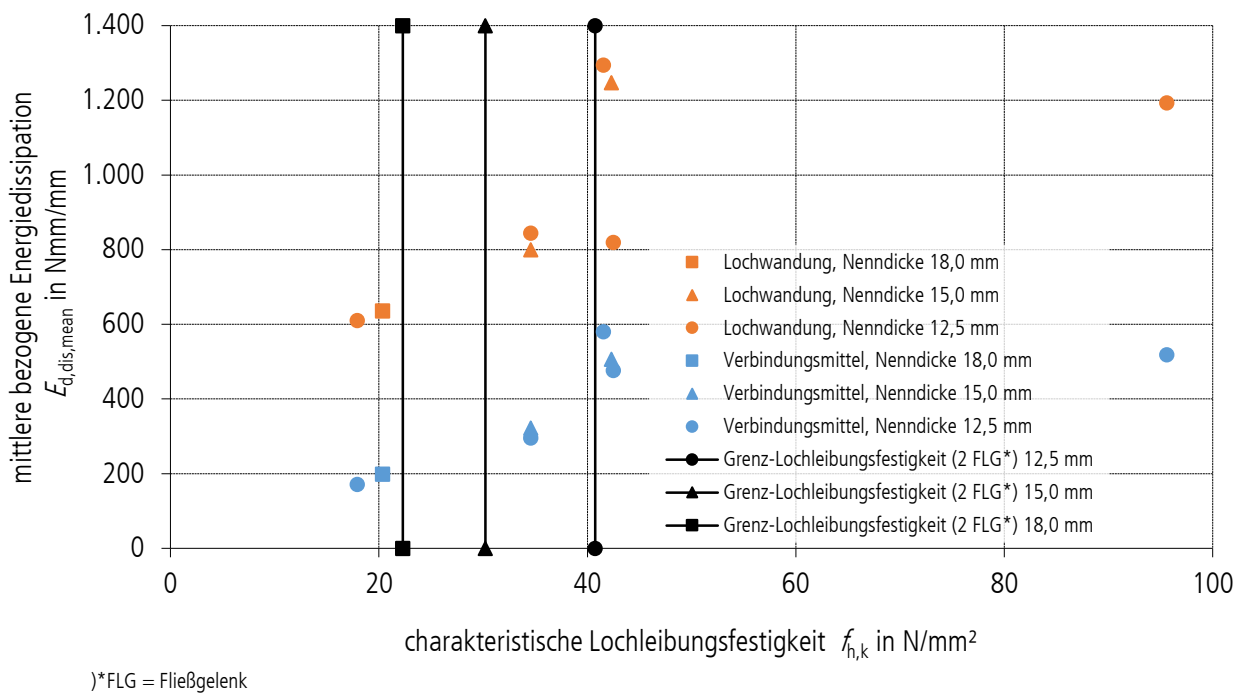


Bild 7.17 Abgebildet ist die mittlere bezogene Energiedissipation in Abhängigkeit von der rechnerischen Lochleibungsfestigkeit der betrachteten gipsgebundenen Plattenwerkstoffe unterschiedlicher Nenndicken. Es wird zwischen Energiedissipation aus dem Verbindungsmittel (blau) und der Deformation der Lochwandung (orange) unterschieden.

An Platten einer Nenndicke von 12,5 mm kann beim Überschreiten der Grenz-Lochleibungsfestigkeit zur Ausbildung von 2 Fließgelenken ein sprunghafter Anstieg der bezogenen mittleren Energiedissipation beobachtet werden. Auffällig ist das Ergebnis für die Gipsfaserplatte des Typs GF-C1-I-W2 der Nenndicke 12,5 mm. Die im Vergleich zu den anderen Proben im Untersuchungsumfang eine hohe rechnerische Lochleibungsfestigkeit besitzt. Dies aber führt nicht zu einer größeren bezogenen mittleren Energiedissipation.

Hierfür können zwei Erklärungen in Betracht gezogen werden:

- Die rechnerische Lochleibungsfestigkeit wurde aus Versuchen abgeleitet und ist zu hoch angenommen.
- Mit zunehmender Lochleibungsfestigkeit nimmt bei Ausbildung von zwei Fließgelenken der Abstand der Fließgelenke ab und bei gleicher Verschiebung der Rotationswinkel zu. Das Verbindungsmittel beginnt bei geringeren Verschiebungen zu fließen. Ein Verdichten des Plattenwerkstoffs an der Lochwandung findet nur geringfügig statt, da der Werkstoff bereits eine hohe Lochleibungsfestigkeit und somit für gipsgebundene Werkstoffe auch eine hohe Rohdichte aufweist.

In Bild 7.18 ist die aus Versuchen bestimmte mittlere bezogene Energiedissipation aufgrund der Ausbildung von 2 Fließgelenken dem rechnerischen Abstand der Fließgelenke gegenübergestellt. Es werden nur Versuchsdaten berücksichtigt, die rechnerisch die Ausbildung von zwei Fließgelenken aufweisen.

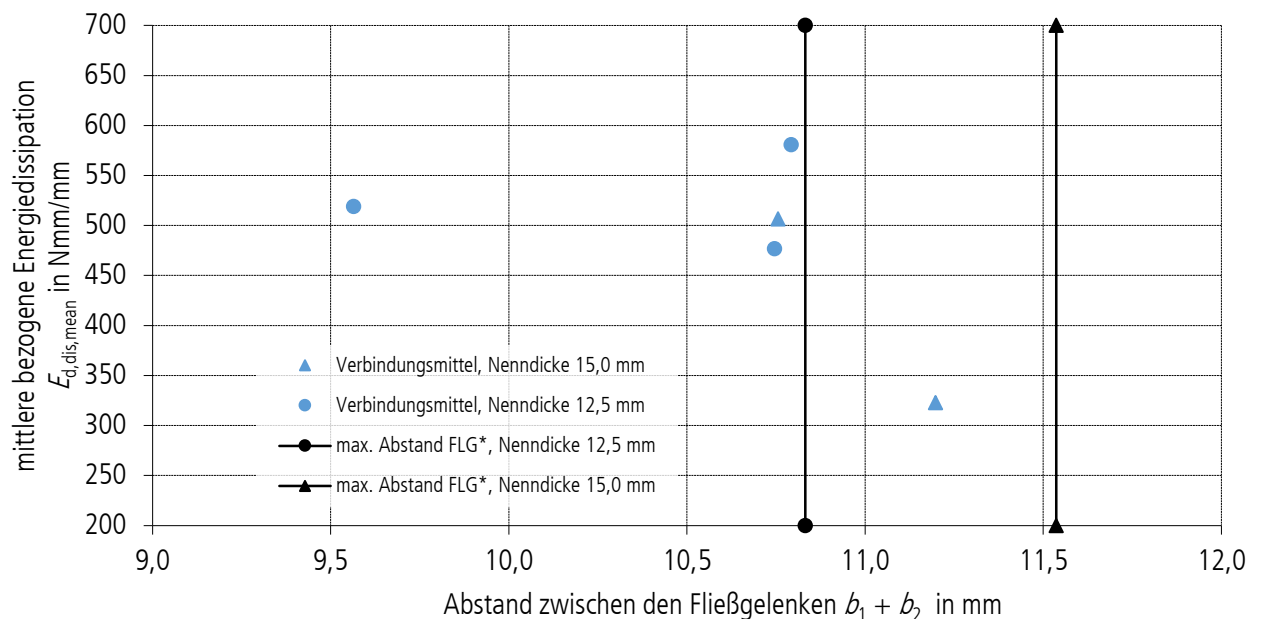


Bild 7.18 Abgebildet ist die mittlere bezogene Energiedissipation aufgrund der Ausbildung von zwei rechnerischen Fließgelenken in Abhängigkeit des Abstands der Fließgelenke der betrachteten gipsgebundenen Plattenwerkstoffe unterschiedlicher Nenndicken. Gekennzeichnet sind die Grenz-Abstände zur Ausbildung von 2 Fließgelenken (2 FLG\*) der Platten unterschiedlicher Nenndicke.

Im Diagramm sind die höchsten Werte der Energiedissipation bei einem Abstand der Fließgelenke von 10,7 mm bis 10,8 mm festzustellen. Für Platten der Nenndicke 12,5 mm nimmt die Energiedissipation mit zunehmendem Abstand der Fließgelenke tendenziell zu. Begrenzt ist der Abstand durch den maximalen Abstand zur Ausbildung von zwei Fließgelenken. Wird dieser überschritten tritt rein rechnerisch nur noch ein Fließgelenk auf. Für Platten mit einer Nenndicke von 15,0 mm wurde die Versagenstheorie an den Versuchskörpern überprüft. Für die Serie DFH2IR-15,0 H-3-2-1 mit einem rechnerischen Abstand der Fließgelenke von 11,2 mm wurde festgestellt, dass es nicht zur Ausbildung von zwei Fließgelenken gekommen war.

Die Erkenntnisse legen den Schluss nahe, dass ein gutes duktilen Verhalten vorliegt, wenn sich zwei Fließgelenke ausbilden und diese einen möglichst großen Abstand haben. Die Folge ist eine möglichst große Verschiebung der Verbindung bei möglichst kleinem Rotationswinkel des Fließgelenks. Geringere Rotationswinkel im plastischen Bereich führen zu einer langsameren Versprödung des Verbindungsmittels. Das Verbindungsmittel kann mehr Zyklen aufnehmen. Zur Erzielung eines großen Abstands der Fließgelenke ist es notwendig, dass die Lochleibungsfestigkeit gerade ausreichend ist, um zwei Fließgelenke auszubilden. Eine zu große Lochleibungsfestigkeit und damit verbunden ein kleiner Abstand der Fließgelenke reduziert die Energiedissipationsfähigkeit.



### 7.3 Betrachtung des Verbindungsmittels

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Klammern als Verbindungsmittel gewählt. Klammern können im Vergleich zu anderen typischerweise für die Befestigung der Beplankung von Wandscheiben genutzten Verbindungsmitteln wie Nägeln oder Schrauben vergleichsweise nur geringe Abscherkräfte als einzelnes Verbindungsmittel übertragen. Das heißt, dass Schrauben und Nägel lokal größere Kräfte in die Platten einleiten. Durch die notwendige größere Anzahl an Klammern wird eine homogenere Übertragung der Scheiben-Kräfte in die Platte erzielt [vgl. 28].

Die Klammer weist das geringste Fließmoment der betrachteten Verbindungsmittel auf. Klammern werden mit glattem Schaft hergestellt. Im Vergleich zu Schrauben oder geringten Nägeln findet keine Versprödung durch Anrollen von Ringen oder Kaltverformen eines Gewindes statt. Ebenso werden bei der Klammer keine Kerben geschaffen, an denen sich Risse bilden können.

Um den Einfluss der verschiedenen Verbindungsmittel auf das duktile Verhalten einer Verbindung beurteilen zu können, wurden an den verschiedenen Verbindungsmitteltypen zyklische Prüfungen des Fließmoments vorgenommen. Dabei wurden die Grundlagen von DIN EN 409:2009-08 „Holzbauwerke - Prüfverfahren - Bestimmung des Fließmoments von stiftförmigen Verbindungsmitteln“ beachtet und durch die Vorgaben der zyklischen Prüfung in Anlehnung an DIN EN 12512 ergänzt. Es wurde ein Prüfaufbau entwickelt, der es ermöglicht, das Fließmoment zyklisch zu prüfen. Ziel der Betrachtung der verschiedenen Verbindungsmittel ist, eine Aussage zu treffen, die den Einfluss des gewählten Verbindungsmittels im Vergleich zu anderen möglichen Verbindungsmitteln hinsichtlich der duktilen Eigenschaften bewertet.

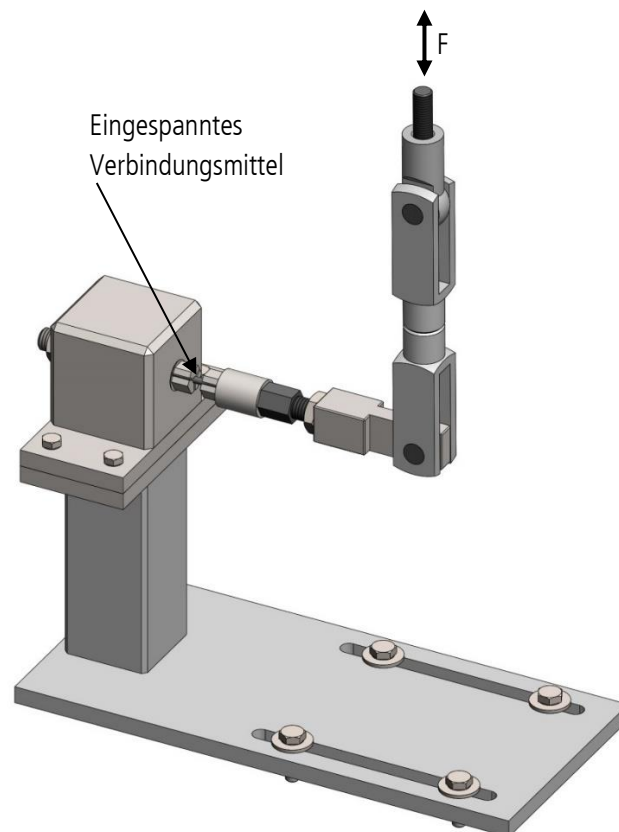


Bild 7.19 Spannvorrichtung für die zyklische Prüfung des Fließmoments. Am Hebelarm wird eine wechselnde Last aufgebracht. Das Verbindungsmittel ist zwischen dem Spannblock und dem Hebelarm eingespannt.





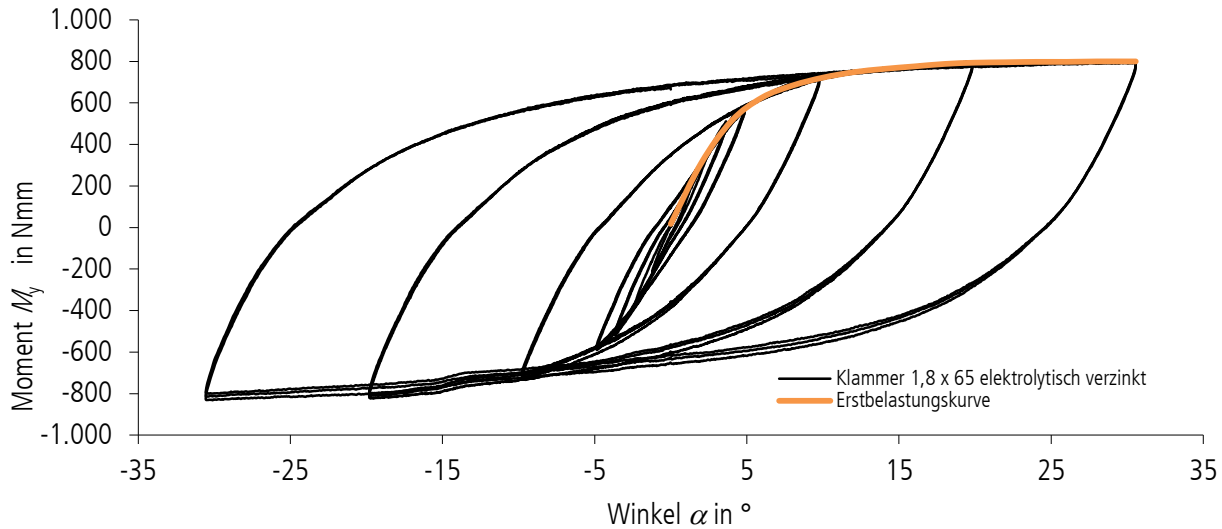


Bild 7.22 Hysteresekurve eines zyklischen Versuchs nach DIN EN 12512 an einem Schaft einer Klammer BeA Typ 180/65. Abgebildet ist auch die Erstbelastungskurve im positiven Bereich der Biegewinkel der Hysteresekurve.

An Verbindungsmitteln aus der gleichen Produktionscharge wurden Versuche nach DIN EN 409 durchgeführt, um die Momentenkurve zu bestimmen. Bei den Versuchen wurde die Verdrehung monoton gesteigert (siehe Bild 7.20 und Bild 7.21).

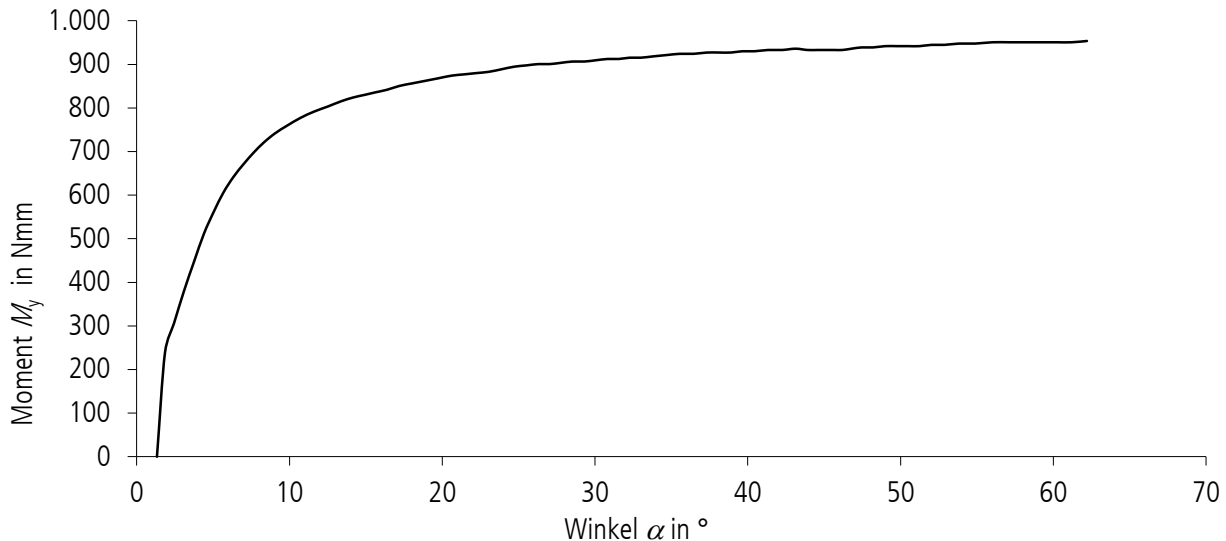


Bild 7.23 Momentenkurve eines monotonen Versuchs nach DIN EN 409 an einem Schaft einer Klammer BeA Typ 180/65.

Aus den Versuchsserien der Versuche nach DIN EN 409 und DIN EN 12512 wurden mittlere Erstbelastungskurven und Momentenkurven bestimmt. Alle Verbindungsmittel innerhalb einer Versuchsserie zeigten ein gleiches Verhalten. Die mittleren Kurven von Klammern sind in Anhang C vollständig enthalten.

Die mittleren Erstbelastungskurven und die mittleren Momentenkurven wurden für jedes Verbindungsmittel gegenübergestellt. Die größten Momente und die größte relative Differenz zwischen Erstbelastungskurve und Momenten-

kurve wurden bei Versuchen an Schrauben festgestellt. Prinzipiell liegen die Erstbelastungskurven geringfügig unterhalb der Momentenkurve. Dies ist auf eine Versprödung und der damit einhergehenden Schädigung des Gefüges des metallischen Materials der Verbindungsmittel durch die zyklische Beanspruchung zurückzuführen.

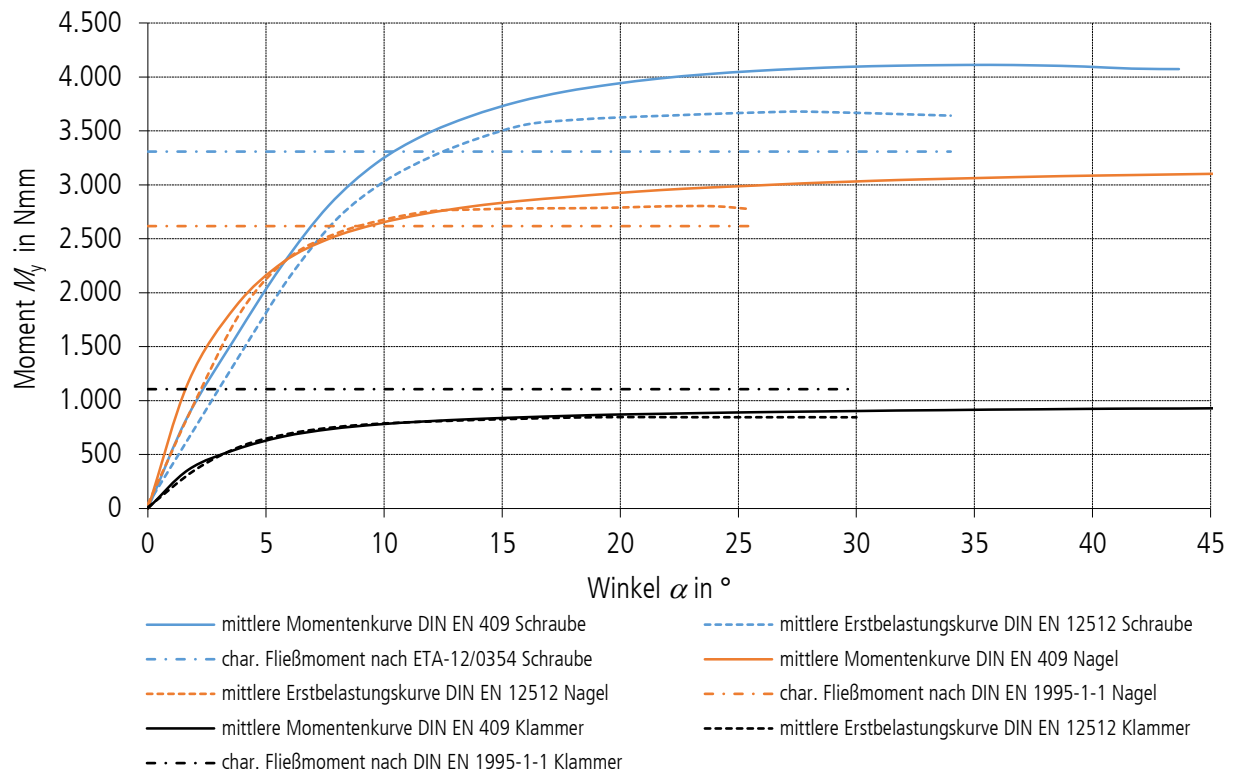


Bild 7.24 Gegenüberstellung der Erstbelastungskurven nach DIN EN 12512 und der Momentenkurven nach DIN EN 409. Abgebildet wird auch das rechnerische charakteristische Bemessungsniveau des Fließmoments  $M_{y,Rk}$  nach DIN EN 1995-1-1, Gleichung (8.29).

Neben den Erstbelastungskurven und den Momentenkurven ist in Bild 7.24 das rechnerische charakteristische Bemessungsniveau abgebildet. Das rechnerische charakteristische Niveau wird sowohl von den betrachteten Schrauben als auch von den betrachteten Nägeln erreicht. Der Biegewinkel bei Erreichen des rechnerischen charakteristischen Bemessungsniveaus für den Ringnagel 2,8x80 elektrolytisch verzinkt betrug im Mittel bei zyklischer Beanspruchung 9°. Das rechnerische charakteristische Bemessungsniveau von Schrauben BeA Fix SK wurde im Mittel bei einem Biegewinkel von 12,5° erreicht. Klammern BeA Typ 180/65 erreichten sowohl bei monotonen als auch zyklischen Versuchen das rechnerische charakteristische Bemessungsniveau nicht.

Die hier betrachteten Klammern erreichten das vollplastische Moment (Fließmoment) beim geringsten Biegewinkel aller untersuchten Verbindungsmittel. Schrauben benötigten die größten Biegewinkel, um ein vollplastisches Moment zu erreichen.

Im Hinblick auf eine Beanspruchung durch Erdbeben ist es günstig, die vollplastischen Momente frühzeitig (bei geringen Biegewinkeln) zu erreichen. Geringe Biegewinkel bedeuten auch geringe Verschiebungen der Konstruktion. Wenn es Ziel ist, ein Bauteil bei möglichst geringen Verformungen zum Fließen zu bringen, sind diese Eigenschaften durch Verwendung einer Klammer bei geringen Verformungen zu erreichen.

Durch das Erreichen des vollplastischen Moments bei geringen Biegewinkeln wird auch bei geringen Verformungen bereits Energie dissipiert. Der Bereich des rein elastischen Verhaltens des Bauteils wird im Vergleich zu den anderen betrachteten Verbindungsmitteln nach kleineren Verformungen verlassen.



## 8 Bestimmung von Schädigungsparametern der Scherkörper

### 8.1 Grundsätzliche Überlegungen zur Schädigung

Im Rahmen der Untersuchungen wurden zwei relevante Parameter als Indikator für die Schädigung durch zyklische Beanspruchung bestimmt. Da für die praktische Anwendung die Parameter Steifigkeit und Tragwiderstand eine zentrale Rolle spielen, wurden diese in Abhängigkeit von der Energiedissipation betrachtet. Die Energiedissipation kann auch als geleistete Arbeit verstanden werden. Es wird dabei zwischen dem Erstbelastungsbereich und einer Wiederbelastung unterschieden.

Zur Beschreibung des hysteretischen Verhaltens sind verschiedene Modelle bekannt. Die Modelle können nach [14] in drei Gruppen aufgeteilt werden:

- elastisch-plastische Modelle (bilinear).
- Modelle die höchstlastorientiert sind (peak oriented).
- Modell mit eingeschnürter Form (pinching).

Elastisch-plastische und elastisch-ideal plastische Modelle werden als einfache Modelle bezeichnet, die in der Regel für eine Kraft-Verformung mit eindeutiger Fließgrenze bzw. eindeutigem bilinearem Verhalten Verwendung finden. Die Energiedissipation ist aufgrund des Plastizierens für diese Modelle groß. Für die Modellbildung der einschnittigen Verbindung und der Wandscheibe im Rahmen dieser Untersuchung eignen sich besonders Modelle mit eingeschnürter Form. Diese zeichnen bei wiederholten Zyklen gleicher Verschiebung durch eine zu Beginn der Verschiebung in positive oder negative Richtung deutlich geringere Energiedissipation aus. Von [31] wird der Unterschied hinsichtlich der erforderlichen Duktilität zwischen einem elastisch-ideal plastischen Modell und dem Modell mit eingeschnürten Zyklen als unwesentlich hinsichtlich der Bestimmung von Verhaltensbeiwerten „q“ bezeichnet. Dies wird dadurch begründet, dass das Hauptmerkmal zur Bestimmung der Verhaltensbeiwerte das Deformationsvermögen und nicht die Energiedissipation ist (vgl. auch [30]).

Neben der grundsätzlichen Modellbildung für die einschnittige Verbindung soll auch die Schädigung (plastische Deformation der Lochwandung, Verfestigung des Verbindungsmittels) berücksichtigt werden. Ansätze zu einer Vorgehensweise zur Berücksichtigung einer Schädigung finden sich in [13]. Dabei wird die Steifigkeit in Abhängigkeit von der Energiedissipation reduziert. Um diese abzubilden, bedarf es einer numerischen Lösung. Die zur Modellbildung verwendeten Parameter werden nachfolgend beschrieben.

### 8.2 Reduktion der Steifigkeit

Die Steifigkeiten wurden in dem Belastungsbereich zwischen 10 % und 40 % von  $F_{\max}$  des Druckhalbzyklus in Anlehnung an DIN EN 12512 bestimmt. Die Bestimmung der Steifigkeit in dem Bereich zwischen 10 % und 40 % von  $F_{\max}$  ist die im Holzbau gebräuchlichste Methode und deckt sich mit dem Vorgehen zur Bestimmung der Steifigkeit in verschiedenen anderen Bauarten.

Durch die Unterscheidung von Erst- und Wiederbelastung im Hinblick auf die Beschreibung eines Parameters zur Reduktion, ist festzustellen, dass in den Zyklen im Bereich der Wiederbelastung eines Zyklenkollektivs gleicher Verschiebungsamplituden geringere Steifigkeiten erzielt werden als bei einer Erstbelastung. Bei einer Wiederbelastung beruht die Steifigkeit lediglich auf der Biegesteifigkeit des Verbindungsmittels. Eine Beanspruchung der Lochwandung der Platte und die volle Reibung zwischen Beplankung und Unterkonstruktion werden nur bei einer Erstbelastung aktiviert. Die Steifigkeit bei Erstbelastung wird in Abhängigkeit von der Verschiebung betrachtet, da die Aktivierung der Steifigkeit bei Erstverschiebung eine plastische Deformation der Lochwandung herbeiführt und dies maßgeblichen Einfluss auf die Steifigkeit hat.

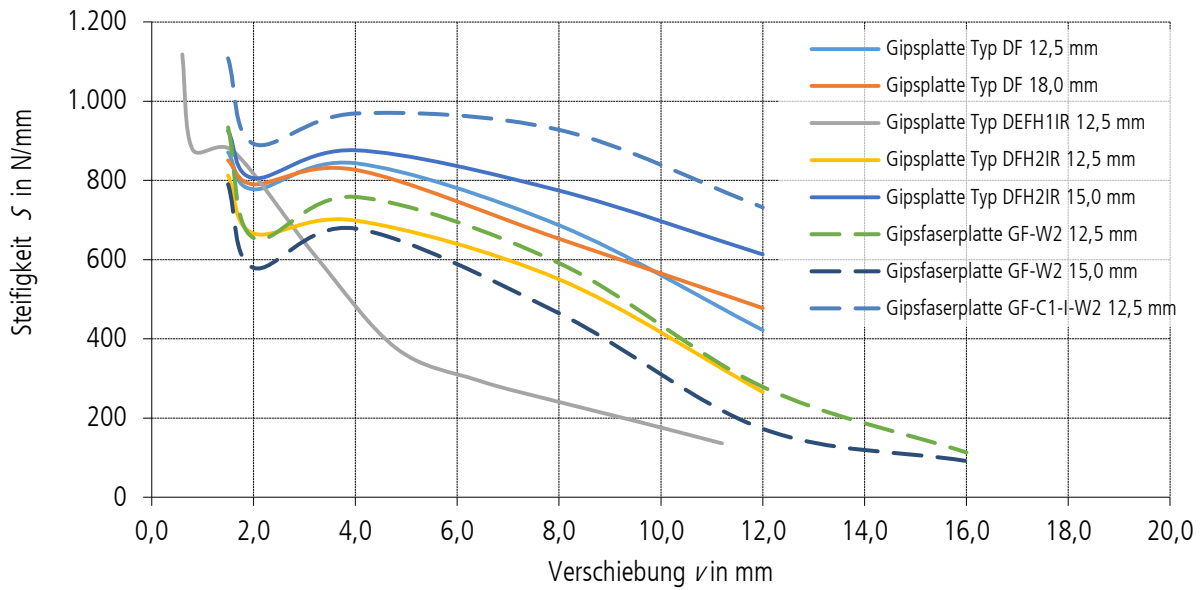


Bild 8.1 Reduzierung der Steifigkeit bei Erstbelastung in Abhängigkeit von der Verschiebung. Grundlage sind die Mittelwerte der Steifigkeit der Versuchsreihen aus dem Druckhalbzyklus der Zyklen ab dem 3. Zyklus.

Bei einer Wiederbelastung wurde eine geringere Steifigkeit als bei einer Erstbelastung erreicht. Um die Reduktion der Steifigkeit bei Wiederbelastung zu beschreiben, wird die Steifigkeit in Abhängigkeit von der dissipierten Energie betrachtet. Dies berücksichtigt die Schädigung der metallischen Verbindungsmittel durch wiederholte Plastifizierung.

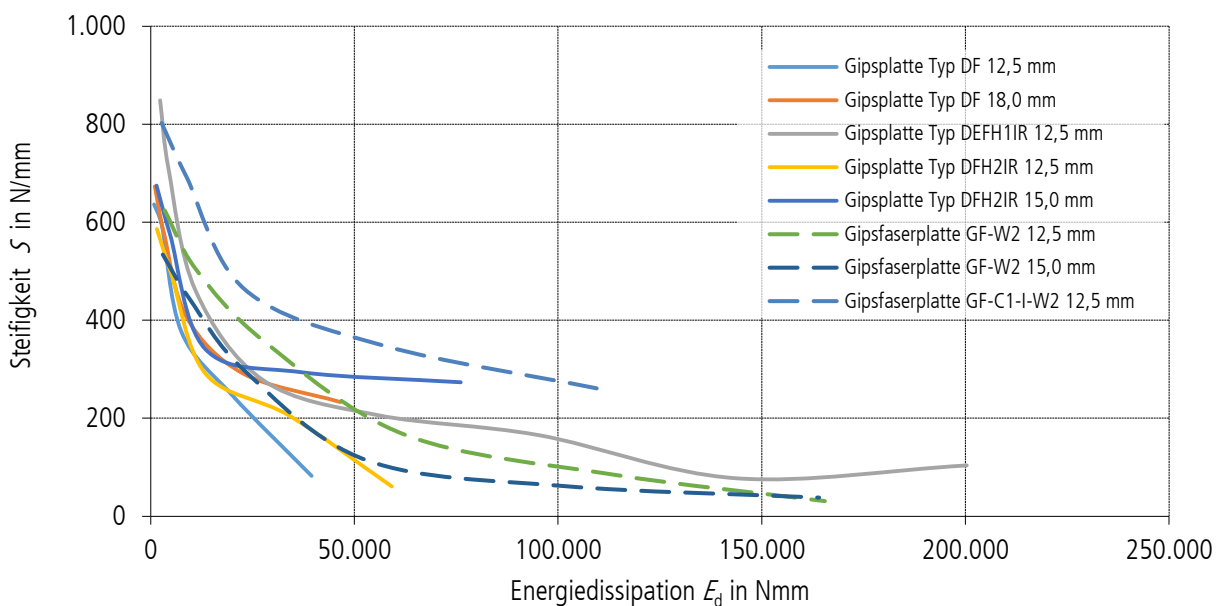


Bild 8.2 Reduzierung der Steifigkeit bei Wiederbelastung in Abhängigkeit von der kumulierten Energiedissipation. Grundlage sind die Mittelwerte der Steifigkeit der Versuchsreihen aus dem Druckhalbzyklus der Zyklen ab dem 3. Zyklus. Zugeordnet wird die kumulierte Energiedissipation nach vollendetem Zyklus aus Wiederbelastung.

Alle Verläufe der Reduzierung der Steifigkeit bei Erst- und Wiederbelastung aus den betrachteten einschnittigen Verbindungen mit verschiedenen Plattenwerkstoffen weisen eine vergleichbare Charakteristik auf. Betrachtet man die Platten noch einmal differenziert zwischen kartonummantelten Platten und Gipsfaserplatten, kann man bei den kartonummantelten Platten (Gipsplatten) ein noch deutlicher vergleichbares Verhalten feststellen.

Aus den Verläufen wird exemplarisch für einen Plattentyp eine Näherung für die Reduzierung der Steifigkeit in Abhängigkeit einer Erst- und Wiederbelastung ermittelt. Bei dem Beispiel handelt es sich um Gipsfaserplatten des Typs GF-W2 der Nenndicke 12,5 mm. Diese Platte liegt in einem mittleren Bereich aller betrachteten Platten bei der Darstellung der Reduktion der Steifigkeit, getrennt nach Erst- und Wiederbelastung.

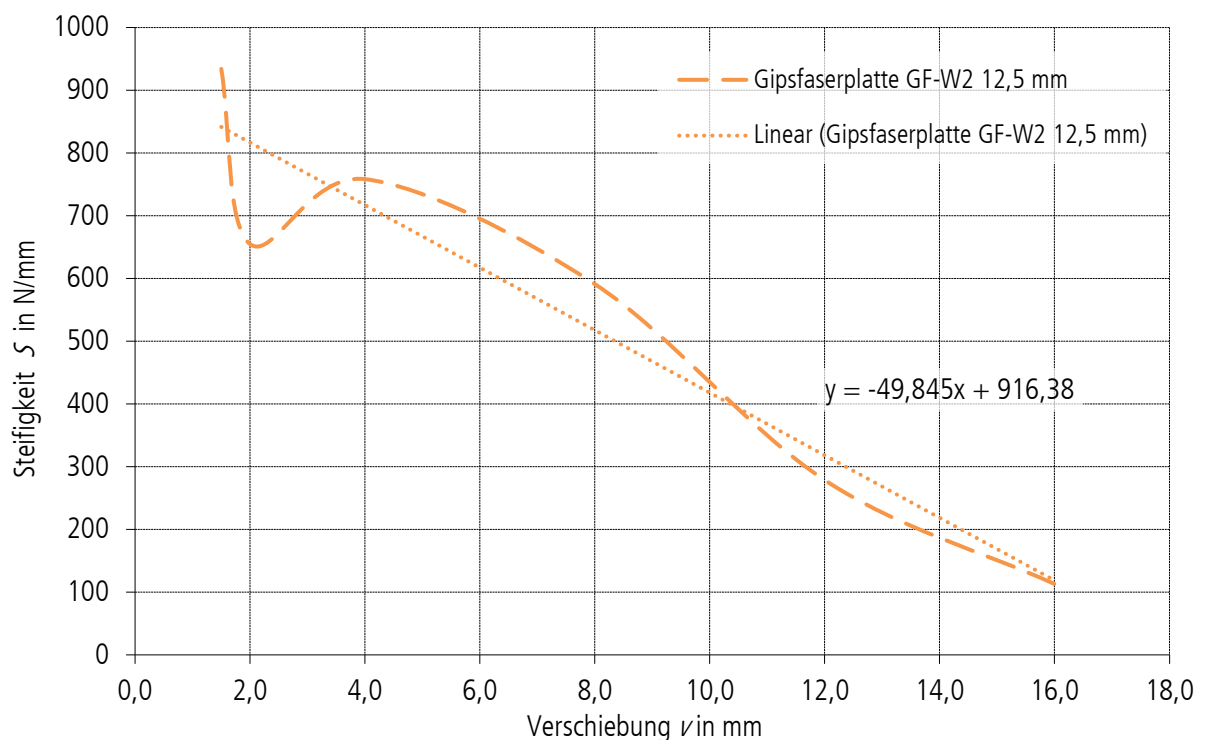


Bild 8.3 Lineare Approximation der Reduzierung der Steifigkeit bei Erstbelastung in Abhängigkeit von der maximal aufgetragenen Verschiebung einer Gipsfaserplatte des Typs GF-W2 der Nenndicke 12,5 mm. Grundlage sind die Mittelwerte der Steifigkeit der Versuchsreihe aus dem Druckhalbzyklus der Zyklen ab dem 3. Zyklus.

Der Verlauf der Steifigkeit  $S$  bei Erstbelastung wird durch eine lineare Funktion angenähert. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die Steifigkeit in der Realität den Wert  $S = 0$  N/mm oder negative Werte nicht annehmen wird. Vielmehr wird sich die Steifigkeit dem Wert  $S = 0$  N/mm asymptotisch annähern. Daher besitzt die Näherung ihre Gültigkeit ausschließlich für betragsmäßige Verschiebungen im Bereich von  $-16,0 \text{ mm} \leq \nu \leq 16,0 \text{ mm}$ . Eine Verschiebung wird immer ausgehend vom Nullpunkt betrachtet. In der hier vorliegenden Publikation werden größere Verschiebungen als 16,0 mm nicht als relevant betrachtet, da davon auszugehen ist, dass Verschiebungen größer 16,0 mm zu einer nicht mehr akzeptablen Schädigung der Verbindung führen.

Für die Wiederbelastung wird eine logarithmische Näherung der Steifigkeit  $S$  in Abhängigkeit von der Energiedissipation bestimmt. Für kleine Hysteresen mit geringer Energiedissipation wird die Steifigkeit auf  $S \leq 700$  N/mm begrenzt. Für eine Wiederbelastung sollen die Steifigkeiten unterhalb den Steifigkeiten einer Erstbelastung liegen. Mit zunehmender Energiedissipation (Arbeit) nimmt die Steifigkeit ab und nähert sich asymptotisch dem Wert  $S = 0$  N/mm an. Auch für eine Wiederbelastung besitzt die Näherung ihre Gültigkeit ausschließlich für betragsmäßige Verschiebungen im Bereich von  $-16,0 \text{ mm} \leq \nu \leq 16,0 \text{ mm}$ .

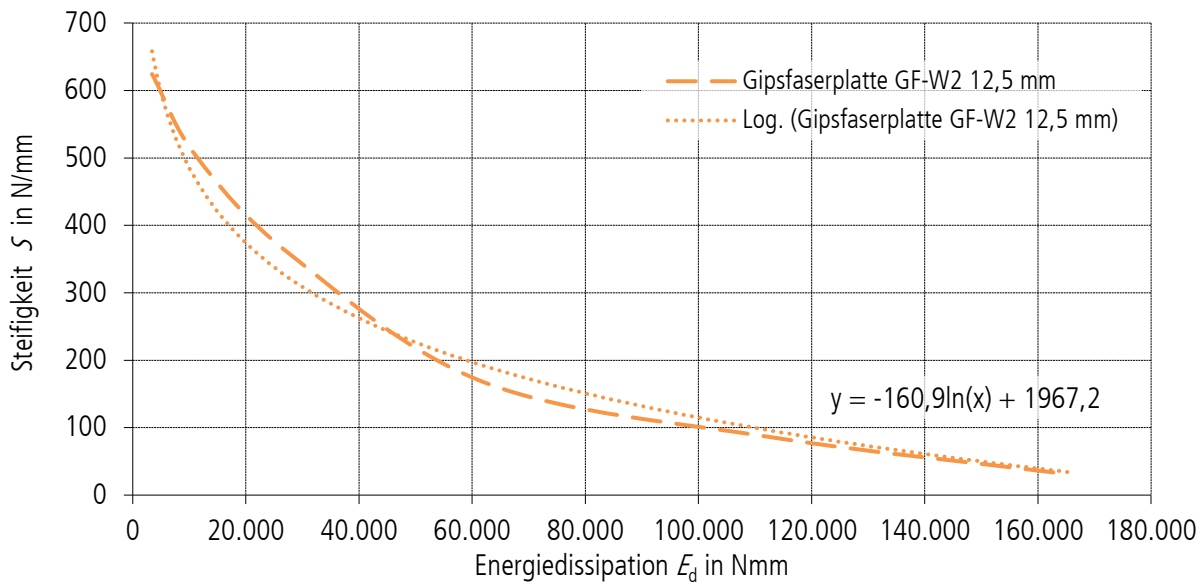


Bild 8.4 Logarithmische Approximation der Reduzierung der Steifigkeit bei Wiederbelastung in Abhängigkeit von der kumulierten Energiedissipation von Gipsfaserplatten des Typs GF-W2 der Nenndicke 12,5 mm. Grundlage sind die Mittelwerte der Steifigkeit der Versuchsreihen aus dem Druckhalbzyklus der Zyklen ab dem 3. Zyklus. Zugeordnet wird die kumulierte Energiedissipation nach vollendetem Zyklus aus Wiederbelastung.

### 8.3 Grenzkurve des Tragwiderstandes

Um den Tragwiderstand der verschiebungs-basierten Beanspruchung zu begrenzen, wird der Verlauf der Backbone-Kurve als Kurve mit den maximalen Reaktionskräften hervorgerufen durch eine Verschiebung angenommen. Dadurch werden die als linear angenommenen Steifigkeiten für Erst- und Wiederbelastung begrenzt.

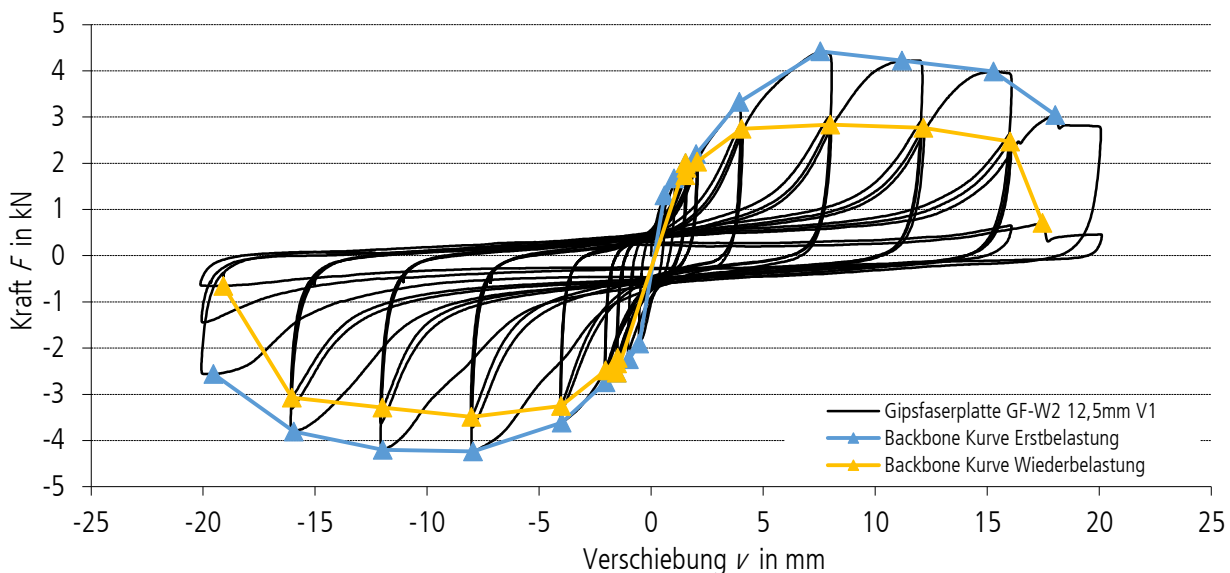


Bild 8.5 Backbone-Kurven für die Erst- und Wiederbelastung von Gipsfaserplatten des Typs GF-W2 der Nenndicke 12,5 mm. Der Verlauf der Backbone-Kurve für die Erstbelastung orientiert sich an der Hüllkurve der 1. Zyklen eines Zyklenkollektivs. Die Backbone-Kurve für die Wiederbelastung ist an den Verlauf der Hüllkurve für die 3. Zyklen eines Zyklenkollektivs angelehnt.



## 8.4 Ansatz zur Entwicklung eines Modells mit Berücksichtigung einer Schädigung

Um zukünftig das Verhalten eines Bauteils unter zyklischer Beanspruchung abbilden zu können, soll das Verhalten der Verbindung in einem Modell möglichst realistisch erfasst werden. Mit dem Modell können dann z.B. Wandscheiben unterschiedler geometrischer Abmessungen beurteilt werden und somit die Eignung unterschiedlicher Geometrien gewertet werden. Denkbar wäre auch die Modellierung gesamter Gebäude. Nachfolgend wird ein solches Modell entwickelt.

Die für die Erstbelastung und Wiederbelastung bestimmten Parameter werden im Folgenden in ein Modell eingefügt. Das Modell basiert auf einer Excel-Programmierung. An dem Modell können wie im realen Versuch Verschiebungen aufgebracht werden. Es wird zwischen Erst- und Wiederbelastung unterschieden. Die Steifigkeiten zur Bestimmung der Reaktionskraft berücksichtigen die zuvor genannten Schädigungsparameter. Die Berechnung erfolgt schrittweise. Der jeweils nächste Schritt baut auf dem Ergebnis des vorhergehenden Schrittes auf. Die Steifigkeiten werden nach vollendetem Zyklus bestimmt und besitzen für den gesamten nachfolgenden Zyklus Gültigkeit. Nachfolgend sind die numerischen Bedingungen für das Modell zusammengestellt.

- Erstbelastung ( $|v_i| > |v_{i-1}|$ ) :

$$F_i = \min \left\{ F_{i-1} + S_1(E_d) \cdot (v_i - v_{i-1}) \right. \\ \left. F_B(v_i) \right. \quad (8.1)$$

mit:

$F_i$  Reaktionskraft im zu berechnenden Schritt.

$F_{i-1}$  Reaktionskraft im vorhergehenden Schritt.

$v_i$  Verschiebung im zu berechnenden Schritt.

$v_{i-1}$  Verschiebung im vorhergehenden Schritt.

$S_1(E_d)$  Steifigkeit bei Erstbelastung in Abhängigkeit von der Energiedissipation (siehe Bild 8.3).

$F_B(v_i)$  Höchstlast gemäß Backbone-Kurve.

- Wiederbelastung ( $|v_i| > |v_{i-1}|$ ) :

$$F_i = \min \left\{ F_{i-1} + S_2(E_d) \cdot (v_i - v_{i-1}) \right. \\ \left. F_B(v_i) \right. \quad (8.2)$$

mit:

$F_i$  Reaktionskraft im zu berechnenden Schritt.

$F_{i-1}$  Reaktionskraft im vorhergehenden Schritt.

$v_i$  Verschiebung im zu berechnenden Schritt.

$v_{i-1}$  Verschiebung im vorhergehenden Schritt.

$S_2(E_d)$  Steifigkeit bei Wiederbelastung in Abhängigkeit von der Energiedissipation (siehe Bild 8.4).

$F_B(v_i)$  Höchstlast gemäß Backbone-Kurve.

- Entlastung ( $|v_i| < |v_{i-1}|$ ) :

$$F = \begin{cases} \text{wenn } v > 0 \rightarrow F = -0,5 \cdot Sp \\ \text{wenn } v < 0 \rightarrow F = +0,5 \cdot Sp \end{cases} \quad (8.3)$$

mit:

$v$  Verschiebung.

$Sp$  Spreizung zwischen den nahezu horizontal verlaufenden unteren Hüllkurven bei Entlastung.

Im Rahmen der Modellierung des Verhaltens wurden Schritte von  $\Delta v = 0,05$  mm und  $\Delta v = 0,1$  mm gewählt. Anhand der Verläufe ist zu erkennen, dass das Modell, siehe Bild 8.6, deutlich zwischen Erst- und Wiederbelastung unterscheidet. Ebenso sind die unterschiedlichen Steigungen bei Wiederbelastung zu erkennen. Diese resultieren aus der Schädigung in Abhängigkeit von der Energiedissipation. Eine Erstbelastung wird dann identifiziert, wenn eine Verschiebung in einen bisher durch Verschiebungen nicht überschrittenen Bereich stattfindet. Da die Steifigkeit für die Erstbelastung am vollen Zyklus zwischen 10 %  $F_{\max}$  und 40 %  $F_{\max}$  bestimmt wurde und im Modell die Erstbelastung an eine Wiederbelastung angehängt wird, wird die Steifigkeit für diese angehängte Erstbelastung gleich der Steifigkeit im ersten Zyklus gewählt. Für die Entlastung bis zum Startpunkt (in der Regel  $v = 0$  mm) wird die Steifigkeit  $S = 0$  N/mm gesetzt. Für den Entlastungsast wird im positiven Verschiebungsbereich eine Kraft von  $F = -0,25$  kN und im negativen Verschiebungsbereich eine Kraft von  $F = 0,25$  kN angenommen. Die Spreizung beträgt 0,5 kN. Dies entspricht in etwa der Lage der horizontalen einhüllenden Entlastungskurve. Der im Modell aufgebrachte Verlauf der Verschiebungen entspricht dem Verschiebungsverlauf der Versuche.

Um das Ergebnis des hier entwickelten rechnerischen Modells bewerten zu können, werden nachfolgend zwei Eigenschaften betrachtet. Die Energiedissipation des Modells wird der Energiedissipation des Versuchs gegenübergestellt und der Verlauf der Einhüllenden wird verglichen.

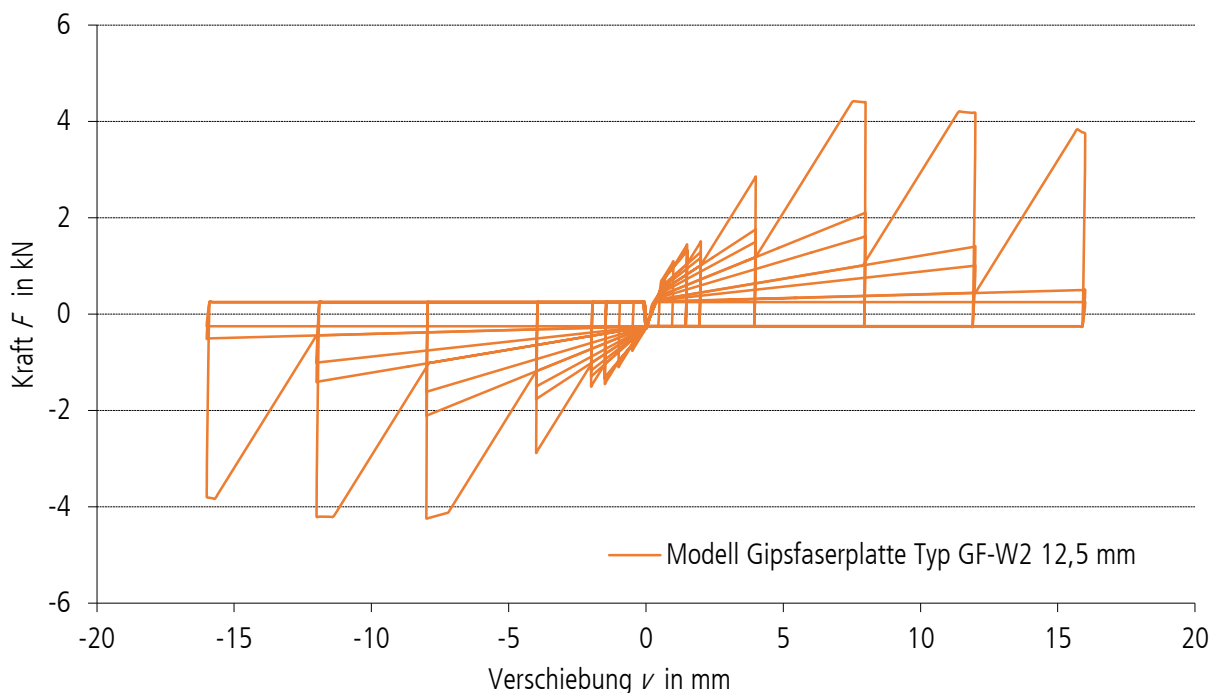


Bild 8.6 Hysterese-Verlauf der Belastung des entwickelten rechnerischen Modells eines Scherkörpers mit Gipsfaserplatten der Typs GF-W2. In dem Modell sind Schädigungsparameter in Bezug auf die Steifigkeit berücksichtigt.

Aus den Hysteresen des Modells und des Versuchs wird die kumulierte Energiedissipation jeweils zum Abschluss eines Zyklenkollektivs bestimmt. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt. Die Werte der Energiedissipation des Versuchs sind Mittelwerte einer Versuchsserie. Es wurde die Energiedissipation von Zyklen bis zu einer Verschiebung von  $\pm 16,0$  mm berücksichtigt, darüber hinaus wird der Probekörper im Sinne einer lastabtragenden Verwendung in einem Bauwerk als zu stark geschädigt betrachtet.

Tabelle 8.4.1 Gegenüberstellung der kumulierten Energiedissipation  $E_d$  in Nmm des Modells und des Versuchs.

	5. Zyklus	8. Zyklus	11. Zyklus	14. Zyklus	17. Zyklus	20. Zyklus
Modell	10.768	22.312	53.091	127.795	213.193	282.856
Versuch, mean	12.629	26.366	64.486	147.931	255.355	353.799
Abweichung	-15 %	-15 %	-18 %	-14 %	-17 %	-20 %

Die kumulierte Energiedissipation des entwickelten rechnerischen Modells weicht zwischen 15 % und 20 % von dem mittleren Versuchsergebnis ab. Das Modell verhält sich bezüglich des Energiedissipationsvermögens konservativ. Das Vermögen des Modells Energie zu dissipieren ist geringer als es in Versuchen am Bauteil nachgewiesen wurde. Um den Verlauf der Einhüllenden des Modells der Einhüllenden der Versuche gegenüberzustellen, werden die Hysteresen in einem Diagramm abgebildet.

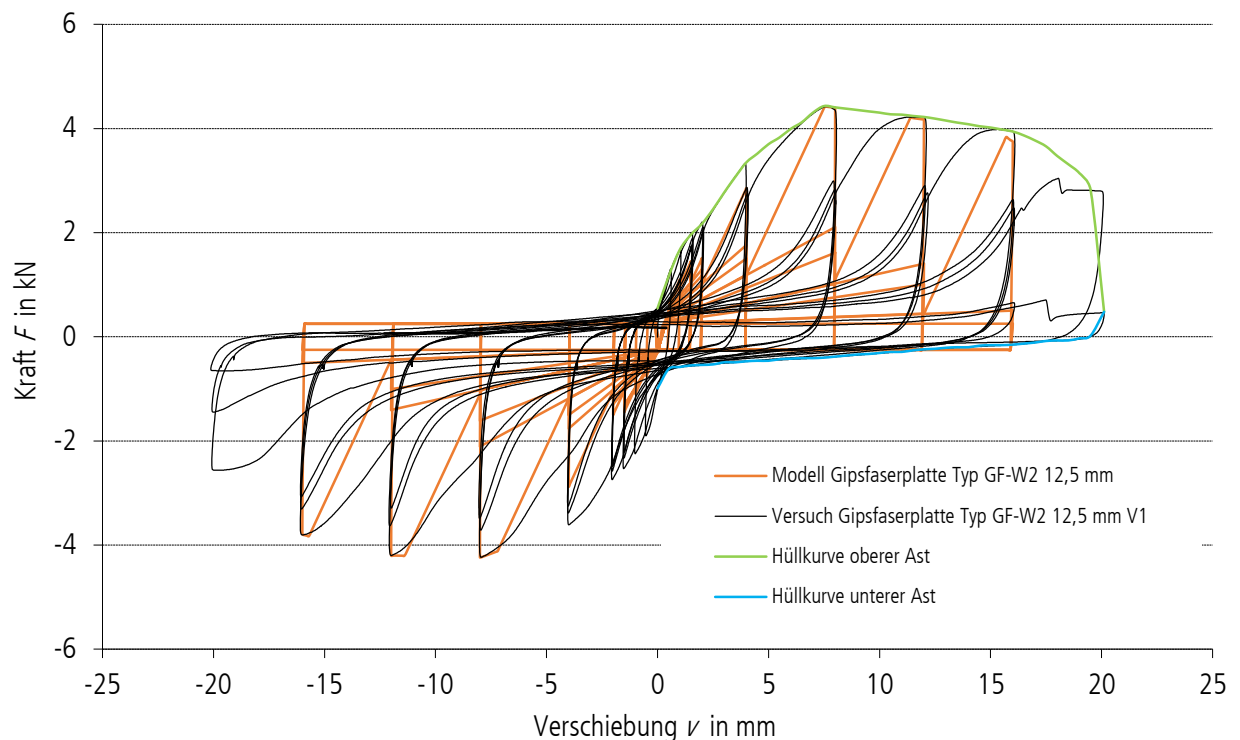


Bild 8.7 Gegenüberstellung der Hysteresen generiert aus dem entwickelten rechnerischen Modell und gemessen an einem Versuch.

Anhand des entwickelten rechnerischen Modells lassen sich die tatsächlich im Versuch bestimmten Hüllkurven abbilden. Zu Beginn der zyklischen Beanspruchung durch aufgebrachte Verschiebungen werden die Kräfte unterschätzt. Die zu Beginn unterschätzten Kräfte werden im Rahmen eines konservativen Ansatzes als akzeptabel betrachtet. Als Grundlage für das Modell wurden die Steifigkeiten der Erst- und Wiederbelastungszyklen bei 10 % von  $F_{\max}$  und 40 % von  $F_{\max}$  bestimmt. Ggf. kann auch ein anderer Bereich zur Bestimmung der Steifigkeit sinnvoll gewählt werden. Bei der Bewertung der Abweichungen der kumulierten Energiedissipation muss berücksichtigt werden, dass die Steifigkeit des Modells anhand der mittleren Steifigkeit der Versuchsreihe bestimmt wurde. Daher ist bei einer exakten Modellierung eines Versuchs mit einer noch größeren Übereinstimmung zu rechnen.



## 9 Erkenntnisse zum globalen Verhalten der Wandscheiben

### 9.1 Allgemeine Erkenntnisse und Grundlagen

Aufgrund der bereits erläuterten Einflüsse (siehe Abschnitt 5.7) der Geometrie von ganzen Bauteilen wurden auch Prüfungen an großformatigen Wandscheiben in Holzrahmenbauweise durchgeführt. Dabei wurde ein Aufbau der Wandscheiben gewählt, der möglichst ungünstig hinsichtlich des duktilen Verhaltens ist. Unter den Voraussetzungen von EN 1995-1-1 werden beim Versagen von aussteifenden Wandscheiben drei mögliche Versagensarten betrachtet. Diese sind Versagen der Verbindung, Schubversagen der Beplankung und Beulen der Beplankung. Ziel der Untersuchungen war es, das Verhalten von Gipsplatten als Beplankung von aussteifenden Wänden in Holzrahmenbauart unter Erdbebenbeanspruchung zu beurteilen. Die Dimensionen der Wandrippen wurden daher so gewählt, dass ein Versagen der Rippenkonstruktion ausgeschlossen war. Der Verbindungsmittelabstand wurde mit 50 mm gering gewählt, um ein Versagen der Platten zu erzwingen. Nachfolgend ist die Konstruktion der aussteifenden Wandtafeln abgebildet.

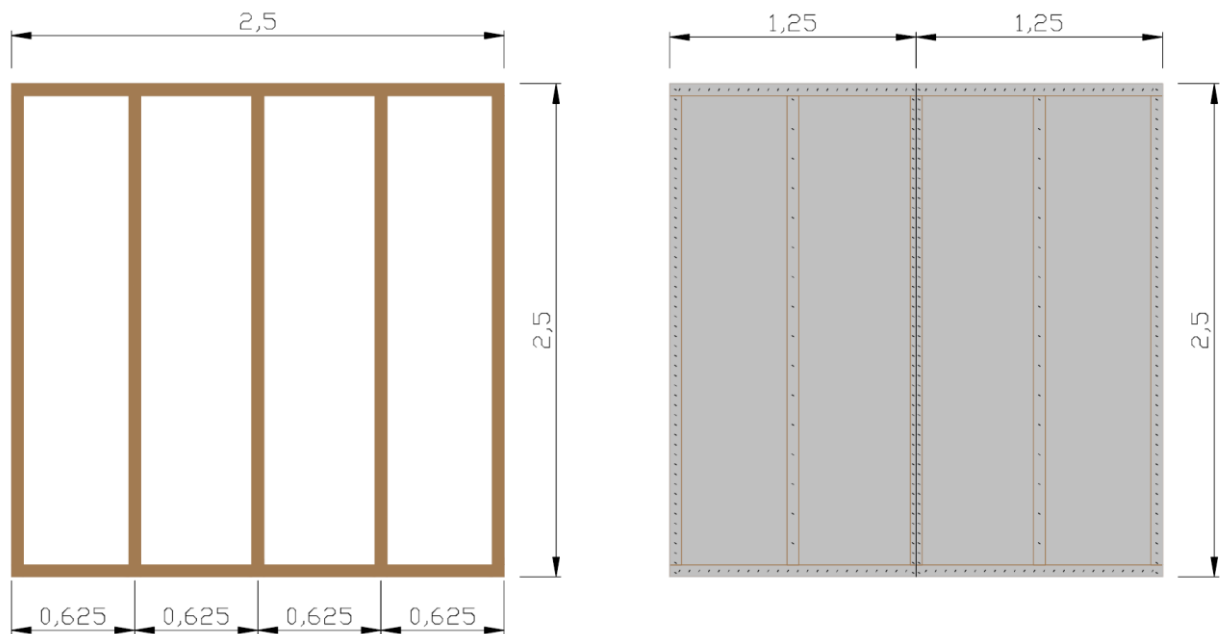


Bild 9.1 Konstruktion der aussteifenden Holzrahmenbauwand. Auf der linken Bildhälfte ist die Abmessung der Konstruktion der Rippen aus technisch getrocknetem, gehobeltem Vollholz mit Keilzinkenstoß (Dimension 60 mm x 160 mm) abgebildet. Die rechte Bildhälfte zeigt die aussteifend mit Gipsplatten beplankte Wand mit den eingebrachten Verbindungsmitteln. (Alle Maße in Meter)

Als Verbindungsmittel wurden Klammern mit den Abmessungen 1,5 mm x 50 mm mit einem Abstand von 50 mm an der Randrippe verwendet. Die randparallele Beanspruchbarkeit  $f_{v,0,Rk}$  wurde nach DIN EN 1995-1-1/NA, NCI zu 9.2.4.2 aus nachfolgender Bedingung bestimmt:

$$f_{v,0,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} k_{v,1} \cdot F_{t,Rk} / s \\ k_{v,1} \cdot k_{v,2} \cdot f_{t,k} \cdot t \\ k_{v,1} \cdot k_{v,2} \cdot f_{v,k} \cdot t \cdot \frac{t \cdot 35}{b_{net}} \end{array} \right. \quad (9.1)$$

mit:

$f_{v,0,Rk}$	Charakteristische rippenrandparallele längenbezogene Beanspruchbarkeit der Wandscheibe.
$k_{v,1}$	Beiwert zur Berücksichtigung der Anzahl an verbundenen Plattenrändern auf der Unterkonstruktion. Für allseitig schubsteif verbundene Plattenränder ist $k_{v,1} = 1,0$ .
$k_{v,2}$	Beiwert zur aus dem Abstand von Rippenachsen und Beplankungsmittelflächen und aus diskontinuierlichen und rechtwinklig zu den Rippenachsen gerichteten Kräften resultierenden zusätzlichen Beanspruchungen der Beplankung. Für beidseitige Beplankung ist $k_{v,2} = 0,5$ ; für einseitige Beplankung ist $k_{v,2} = 0,33$ .
$F_{f,Rk}$	Charakteristischer Wert der Beanspruchbarkeit auf Abscheren eines einzelnen Verbindungsmittels.
$s$	Abstand der Verbindungsmittel auf der Randrippe.
$t$	Plattendicke.
$f_{t,k}$	Kleinsten charakteristischer Wert der Zugfestigkeit der Platte.
$f_{v,k}$	Charakteristischer Wert der Schubfestigkeit der Platte.
$b_{net}$	Lichter Abstand zwischen den Rippen.

Die so konstruierten aussteifenden Wände verfügen über nachfolgend zusammengestellte randparallele Beanspruchbarkeiten der Wandscheiben mit den verschiedenen verwendeten gipsgebundenen Plattenwerkstoffen. Es wurden einseitig und beidseitig beplankte Wandscheiben untersucht.

Tabelle 9.1.1 Charakteristische Werte der längenbezogenen Beanspruchbarkeit  $f_{v,0,Rk}$  in N/mm der untersuchten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankungen aus Gipsplatten nach EN 520 je beplankter Seite.

Rechnerische Versagensart der längenbezogenen Beanspruchbarkeit der Wandscheibe	Beplankung					
	Gipsplatte Typ DF 12,5 mm	Gipsplatte Typ DF 18,0 mm	Gipsplatte Typ DEFH1R 12,5 mm	Gipsplatte Typ DEFH1R 15,0 mm	Gipsplatte Typ DFH2IR 12,5 mm	Gipsplatte Typ DFH2IR 15,0 mm
Versagen Verbindung $f_{v,0,Rk,VM}$	7,2	9,6	11,8	11,5	10,6	11,3
Versagen Platte auf Schub* $f_{v,0,Rk,SCH}$	2,9 (4,4)	3,5 (5,3)	3,7 (5,6)	3,7 (5,6)	2,9 (4,4)	3,5 (5,3)
Versagen Platte auf Beulen* $f_{v,0,Rk,BEU}$	3,2 (4,8)	4,6 (7,0)	7,7 (11,6)	9,2 (13,9)	3,5 (5,3)	5,1 (7,7)
maßgebendes Versagen	Schub	Schub	Schub	Schub	Schub	Schub

)\* Die Ergebnisse in Klammern () sind für Wandscheiben mit beidseitiger Beplankung bestimmt.

Alle so konstruierten aussteifenden Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einseitiger Beplankung weisen ein rechnerisches Versagen der Platten aus. Da das duktile Verhalten maßgeblich aus dem Plastizieren der Verbindungen resultiert, dies aber rechnerisch nicht maßgebend wird, sind die Konstruktionen als ungünstig für Erdbebenbeanspruchung zu betrachten. Bei beidseitiger Beplankung weisen die Wandscheiben mit Beplankung aus Gipsplatten ebenfalls ein rechnerisches Versagen der Platte aus.

Tabelle 9.1.2 Charakteristische Werte der längenbezogenen Beanspruchbarkeit  $f_{v,0,Rk}$  in N/mm der untersuchten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankungen aus Gipsfaserplatten nach EN 15283-2 je beplankter Seite.

Rechnerische Versagensart der längenbezogenen Beanspruchbarkeit der Wandscheibe	Beplankung					
	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 12,5 mm	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 15,0 mm	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 12,5 mm	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 15,0 mm	Gipsfaserplatte Typ GF-I-W2-C1 12,5 mm	Gipsfaserplatte Typ GF-I-W2-C1 15,0 mm
Versagen Verbindung $f_{v,0,Rk,VM}$	11,7	11,8	13,2	13,2	12,2	12,5
Versagen Platte auf Schub* $f_{v,0,Rk,SCH}$	9,5 (14,4)	11,4 (17,3)	9,1 (13,8)	9,9 (15,0)	9,9 (15,0)	11,9 (18,0)
Versagen Platte auf Beulen* $f_{v,0,Rk,BEU}$	11,2 (16,9)	16,1 (24,4)	7,3 (11,1)	10,6 (16,0)	11,5 (17,4)	16,1 (24,4)
maßgebendes Versagen	Schub (Verb.)	Schub (Verb.)	Beulen (Verb.)	Schub (Verb.)	Schub (Verb.)	Schub (Verb.)

)\* Die Ergebnisse in Klammern () sind für Wandscheiben mit beidseitiger Beplankung bestimmt.

Beidseitig mit Gipsfaserplatten beplankte Wandscheiben in Holzrahmenbauweise weisen ein Versagen der Verbindung aus. Um hier ein Plattenversagen zu erzwingen, wären rechnerisch signifikant engere Verbindungsmittelabstände notwendig. Verbindungsmittelabstände kleiner 50 mm sind baupraktisch jedoch unüblich. Im Rahmen der Untersuchungen wurden ausgewählte Kombinationen aus gipsgebundener Platte, Nenndicke und Verbindungsmittel betrachtet. Die Untersuchungen wurden grundsätzlich mit Klammern der Abmessungen 1,5 mm x 50 mm als Verbindungsmittel durchgeführt.

Aus den zyklischen Untersuchungen der aussteifenden Wände konnten Hysteresen ermittelt werden. Dafür wurde am Wandkopf eine richtungswechselnde horizontale Verschiebung aufgebracht. Die Verschiebungen wurden im Verlauf der Beanspruchung bis zum Erreichen des Grenzkriteriums (siehe Abschnitt 6.4) vergrößert, mit dem der Versuch endete.

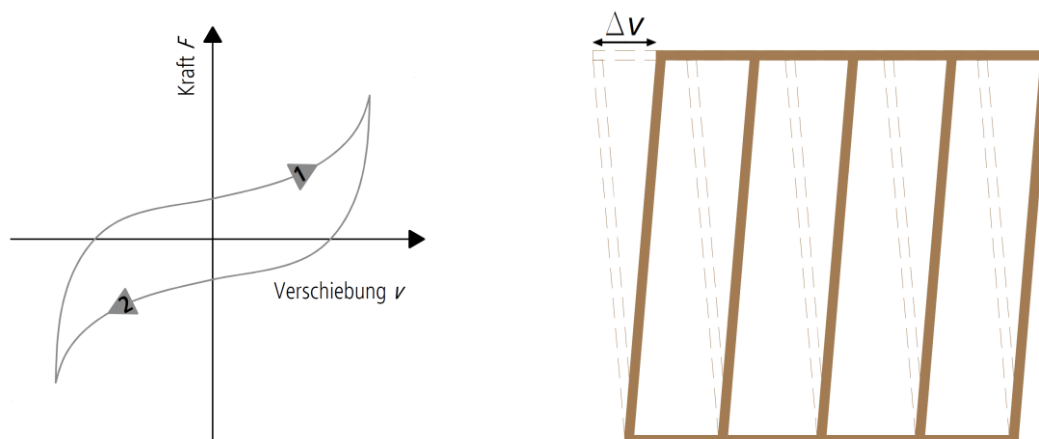


Bild 9.2 Beanspruchung der mit Gipsplatten ausgesteiften Holzrahmenbauwände durch eine richtungswechselnde horizontale Verschiebung  $\Delta v$  am Wandkopf. Abgebildet sind eine Hystereseschleife (linke Bildhälfte) und die verformte Rippenkonstruktion der aussteifenden Wand (rechte Bildhälfte).

Das nachfolgende Diagramm zeigt den vollständigen Hystereseverlauf einer untersuchten aussteifenden Holzrahmenbauwand mit einer Beplankung aus Gipsfaserplatten des Typs GF-W2 der Nenndicke 12,5 mm. Die aufgetragenen Verschiebungen wurden bis zum Erreichen des Grenzkriteriums des Versuchsendes gesteigert. Dabei wurde die nach EN 12512 geforderte Anzahl von Zyklen übertroffen.

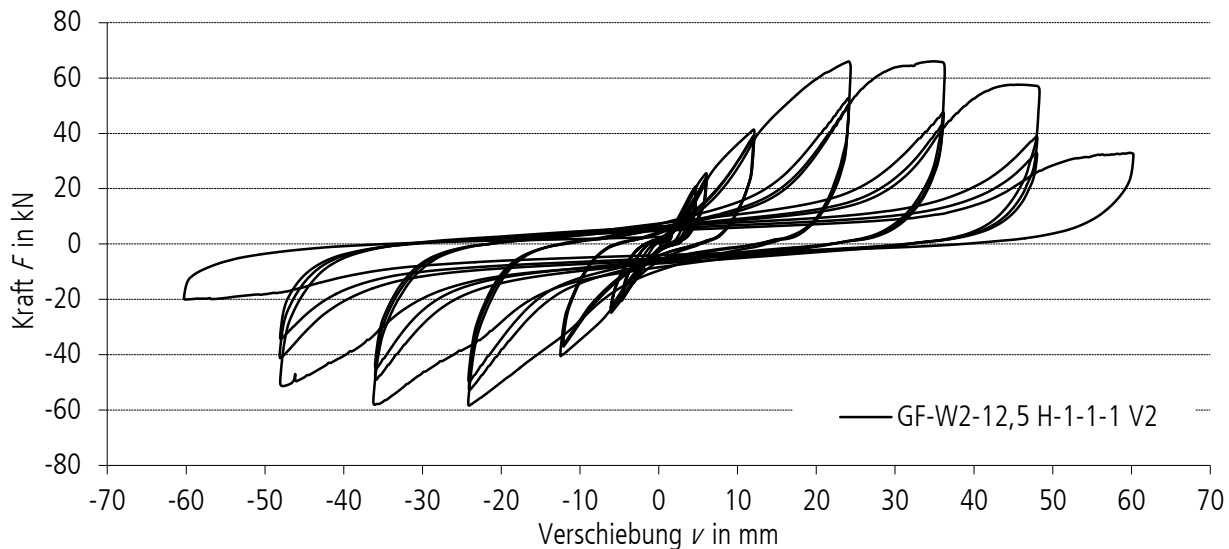


Bild 9.3 Hystereseverlauf einer zyklischen Prüfung an aussteifenden Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einseitiger Beplankung aus Gipsfaserplatten. Versuch-Nr. GF-W2-12,5 H-1-1-1 V2.

## 9.2 Beschreibung der Versagensformen

Das rechnerische Modell von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise kennt verschiedene Versagensformen einer Wandscheibe. Diese sind zuvor bereits ausführlich beschrieben und genannt worden. Im Folgenden wird es als erforderlich angesehen, die Versagensformen bei zyklischer Beanspruchung zu betrachten, um die Nutzbarkeit des rechnerischen Modells der Wandscheibe für zyklische Beanspruchungen zu überprüfen. Im weiteren Verlauf wird daher ausführlich auf die vorgefundenen Versagensabläufe eingegangen.

Die Beschreibung der Versagensformen beschränkt sich auf die zyklischen Versuche, da hier das Hauptinteresse dieser Arbeit liegt. Ergebnisse zu monotonen Versuchen an Wandscheiben mit Beplankungen aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen sind hinreichend bekannt und können z.B. [16] entnommen werden.

An den Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen konnten im Wesentlichen die folgenden Versagensformen festgestellt werden:

- Zugversagen der Platte unter ca.  $45^\circ$  in den Eckbereichen der Wandscheibe.
- Versagen der Platte auf Lochleibung kombiniert mit nachfolgendem Kopfdurchzug der Klammern durch die Platte.
- Versagen der Klammer in der Verbindung aufgrund von Bruch durch wiederholtes Plastizieren.
- Auszug der Klammern aus der Holz-Unterkonstruktion.
- Schubversagen der Platte in der Linie der Verbindungen am Rand der Scheibe.
- Globales Zugversagen der Platte unter einem Winkel von  $45^\circ$ , meist über die gesamte Plattenbreite.

Die Versagensformen Lochleibung/Kopfdurchzug, Bruch der Klammern, Auszug und Schubversagen gehen von den Ecken aus und setzen sich auf den die Scheibe begrenzenden Rippen zu deren Mitten hin fort. Dies geschieht mit zunehmenden Verschiebungs-Amplituden. Um einen Überblick über die Versagensformen und ihr Eintreten zu geben,



werden diese in den nachfolgenden Tabellen zusammengestellt. Es werden Angaben zur Versagensform und der zugehörigen Amplitude des Eintritts angegeben.

### Gipsplatten des Typs „DF“

Tabelle 9.2.1 Eintreten der Versagensmechanismen aus zyklischen Untersuchungen an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DF“ nach DIN EN 520.

Versuch-Nr.	Art der Versagensform und Amplitude (Wert in Klammern) der zyklischen Beanspruchung			
	primär	sekundär	tertiär	quartär
DF-12,5 H-1-2-1	Zugversagen Ecke (12,0 mm)	Lochleibung / Kopfdurchzug (12,0 mm)	-	-
DF-12,5 H-1-2-2	Zugversagen Ecke (12,0 mm)	Lochleibung / Kopfdurchzug (12,0 mm)	Schubversagen (24,0 mm)	-
DF-18,0 H-1-2-2	Zugversagen Ecke (12,0 mm)	Lochleibung / Kopfdurchzug (12,0 mm)	Schubversagen (24,0 mm)	globales Zugversagen (36,0 mm)

Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DF“ der Nenndicke 12,5 mm und mit Auflast zeigten ein überwiegendes Versagen auf Lochleibung der Platte. Die Klammern knöpften sich während des Versuchs durch die Platte. Der Kopfdurchzug setzte sich mit steigenden Amplituden von den Wandecken zu den Seitenmittelpunkten fort. In den Ecken kam es örtlich zu Plattenzugversagen und Abrissen.



Bild 9.4 Lochleibungsversagen der Platte an den Randrippen kombiniert mit Kopfdurchzug der Verbindungsmittel. Versuch-Nr. DF-12,5 H-1-2-2, Probe-Nr. 1. Quelle: VHT



Bild 9.5 Zugversagen in der Wandecke. Der Rückseitenkarton ist gerissen. Die Plattenecke zieht sich nach vorne. Versuch-Nr. DF-12,5 H-1-2-2, Probe-Nr. 3. Quelle: VHT

Wandscheiben mit Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DF“ der Nenndicke 12,5 mm und ohne Auflast zeigten ein ähnliches Verhalten wie die gleichen Wandscheiben mit Auflast (vgl. Abschnitt 6.2). Hier wurden allerdings wesentlich geringere Reaktionskräfte gemessen als bei den Wandscheiben mit Auflast gleichen Typs. Zusätzlich war noch ein Schubversagen der Platte an der Randrippe auf der Zugseite nach dem letzten Zyklus zu beobachten. Es kam zu einem

Versagen auf Lochleibung der Platte. Dieses setzte wesentlich früher ein als bei Wandscheiben mit Auflast. Ebenfalls konnte ein Abheben der Kopfrippe beobachtet werden. Die Klammerrücken zogen sich während des Versuchs durch die Platte. Der Kopfdurchzug setzte sich mit steigenden Amplituden von den Wandecken zu den Seitenmittelpunkten fort. In den Ecken kam es örtlich zu Plattenzugversagen.

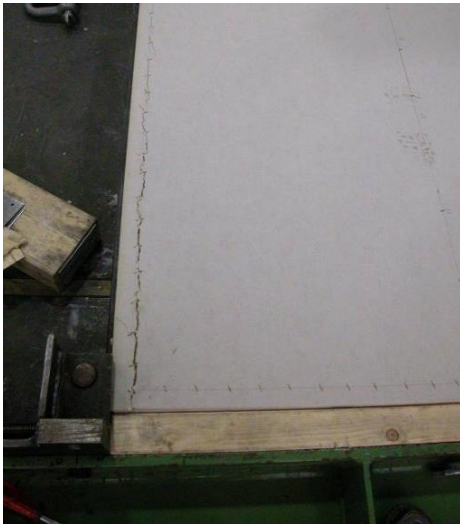


Bild 9.6 Schubversagen der Platte in der Linie der Verbindungsmittel. Versuch-Nr. DF-12,5 H-1-2-1, Probe-Nr. 1. Quelle: VHT



Bild 9.7 Lochleibungsversagen der Platte mit Kopfdurchzug der Klammern durch die Platte. Versuch-Nr. DF-12,5 H-1-2-1, Probe-Nr. 3. Quelle: VHT

Versagenskriterium für Versuche an Wandscheiben mit einer Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DF“ der Nenndicke 18,0 mm und mit Auflast waren Lochleibungsversagen und Zugversagen der Platte. Das Lochleibungsversagen setzte sich von Beginn der zyklischen Beanspruchung mit steigenden Amplituden von den Wandecken zu den Seitenmittelpunkten fort. Dieses Verhalten war allerdings schwächer ausgeprägt als bei Wandscheiben mit Beplankung gleichen Typs der Nenndicke 12,5 mm und war max. im 1. Fünftel der Seiten von der Ecke ausgehend zu beobachten. Ein Kopfdurchzug aller Verbindungsmittel konnte nicht beobachtet werden. Zusätzlich zu dem Lochleibungsversagen in der Platte und dem Kopfdurchzug der Klammern kam es zu einem globalen Zugversagen der Platte während des Zyklus „6  $V_y$ “ (Zyklus mit der maximalen Amplitude). Ebenso konnte ein Schubversagen der Platte an der Randrippe auf der Zugseite beobachtet werden. Neben dem globalen Zugversagen der Platten konnte ebenfalls ein im Bereich der Ecken auftretendes Zugversagen der Platten beobachtet werden.



Bild 9.8 Globales Plattenzugversagen.  
Versuch-Nr. DF-18,0 H-1-2-2, Probe-Nr. 1. Quelle: VHT



Bild 9.9 Schubversagen an der Randrippe. Versuch-Nr. DF-18,0 H-1-2-2, Probe-Nr. 3. Quelle: VHT

### **Gipsplatten des Typs „DFH2IR“**

Tabelle 9.2.2 Eintreten der Versagensmechanismen der zyklischen Untersuchungen an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DFH2IR“ nach DIN EN 520.

Versuch-Nr.	Art der Versagensform und Amplitude der zyklischen Beanspruchung			
	primär	sekundär	tertiär	quartär
DFH2IR-12,5 H-1-2-2	Zugversagen Ecke (24,0 mm)	Lochleibung / Kopfdurchzug (24,0 mm)	-	-
DFH2IR-12,5 H-1-1-2	Zugversagen Ecke (24,0 mm)	Lochleibung / Kopfdurchzug (24,0 mm)	-	-

Die ein- und beidseitig mit Gipsplatten des Typs „DFH2IR“ der Nenndicke 12,5 mm beplankten Wandscheiben, die mit Auflast untersucht wurden, zeigten überwiegend Versagen auf Lochleibung der Platte. Zusätzlich konnte beobachtet werden, dass sich die Klammern während des Versuchs zunehmend durch die Platte knöpften. Der Kopfdurchzug setzte sich mit ansteigenden Verschiebungen der Amplituden von den Wandecken zu den Seitenmittelpunkten fort. In den Ecken kam es örtlich zu Plattenzugversagen und Abrissen an den Ecken.



Bild 9.10 Lochleibungsversagen mit kombiniertem Kopfdurchzug der Klammern an den Randrippen. Versuch-Nr. DFH2IR-12,5 H-1-2-2, Probe-Nr. 1. Quelle: VHT



Bild 9.11 Zugversagen der gipsgebundenen Platte in den Wandecken. Versuch-Nr. DFH2IR-12,5 H-1-2-2, Probe-Nr. 2. Quelle: VHT

### Gipsplatten des Typs „DEFH1IR“

Tabelle 9.2.3 Eintreten der Versagensmechanismen der zyklischen Untersuchungen an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DEFH1IR“ nach DIN EN 520.

Versuch-Nr.	Art der Versagensform und zugehörige Amplitude der zyklischen Beanspruchung			
	primär	sekundär	tertiär	quartär
DEFH1IR-12,5 H-1-1-1	Zugversagen Ecke (26,8 mm)	Lochleibung / Kopfdurchzug (26,8 mm)	Schubversagen (40,2 mm)	-

An den einseitig mit Gipsplatten des Typs „DEFH1IR“ beplankten Wandscheiben konnten verschiedene Versagensformen beobachtet werden. Sie decken sich mit den bereits zuvor beschriebenen Versagensformen der betrachteten Gipsplatten nach DIN EN 520 mit Kartonummantelung. Als erstes Versagen konnte Zugversagen in den Ecken festgestellt werden. Dies geschieht bei noch ansteigendem Tragwiderstand. Nachfolgend versagen die Verbindungen von den Ecken ausgehend. Das Versagen der Verbindungen setzt sich von den Ecken zu den Seitenmitten fort. Als letzte Versagensform tritt Kopfdurchzug der Verbindungsmittel durch die Platte mit einem Ablösen der Platte von der Unterkonstruktion auf. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen wurden auch beanspruchte Verbindungen geöffnet, um die Versagensform zu betrachten.





Bild 9.12 Exemparisch geöffnete einschnittige Klammer-Verbindung einer Gipsplatte Typ „DEFH1IR“ mit einer Holzunterkonstruktion. Versuch-Nr. DEFH1IR-12,5 H-1-1-1, Probe-Nr. 1. Quelle: VHT

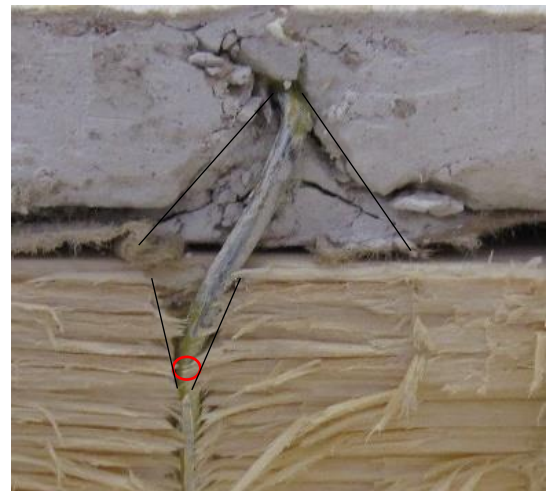


Bild 9.13 Detailbetrachtung der geöffneten Verbindung. Es bildet sich ein Fließgelenk (rot markiert). Der Kopf des Verbindungsmittels ist in der Platte versenkt und ein rückseitiger Ausbruchs-Kegel erkennbar. Markiert sind auch die trichterförmigen Ränder der zyklisch beanspruchten Wandung des Lochs. Versuch-Nr. DEFH1IR-12,5 H-1-1-1, Probe-Nr. 1. Quelle: VHT

### Gipsfaserplatten des Typs „GF-W2“

Tabelle 9.2.4 Eintreten der Versagensmechanismen der zyklischen Untersuchungen an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Gipsfaserplatten des Typs „GF-W2“ nach DIN EN 15283-2.

Versuch-Nr.	Art der Versagensform und Amplitude der zyklischen Beanspruchung			
	primär	sekundär	tertiär	quartär
GF-W2-12,5 H-1-1-1	Zugversagen Ecke (24,0 mm)	Schubversagen (24,0 mm)	Herausziehen + Bruch der Klammern (36,0 mm)	-
GF-W2-15,0 H-1-1-1	Zugversagen Ecke (24,0 mm)	Schubversagen (36,0 mm)	Herausziehen + Bruch der Klammern (36,0 mm)	globales Zugversagen (60,0 mm)

An den mit Gipsfaserplatten des Typs „GF-W2“ beplankten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise konnten verschiedene Versagensmechanismen festgestellt werden. Diese traten zeitlich versetzt auf. Im Verlauf der Beanspruchung trat primär Zugversagen des Plattenwerkstoffs in den Eckbereichen der Wand auf (Bild 9.14). Sekundär konnte ein randparalleles Versagen der Verbindungen entlang der Verbindungsmittellinie festgestellt werden (Bild 9.15). Das Versagen der Verbindungen ging von den Ecken aus und nahm zu den Randmitten zu. Tertiär konnte ein globales Zugversagen der Platten festgestellt werden. Die sich einstellenden Risse verliefen teilweise diagonal durch die Platten (Bild 9.16).

Beim Versagen der Verbindung konnte überwiegend ein Ausziehen der Klammern beobachtet werden. Vereinzelt kam es aufgrund des wiederholten Plastizierens der Klammer zum Bruch der Klammerschäfte. An einzelnen Punkten konnte ein Kopfdurchzug der Klammern beobachtet werden. Der Tragwiderstand steigt im Verlauf der Beanspruchung auch bei eingetretenem primärem Versagen an.

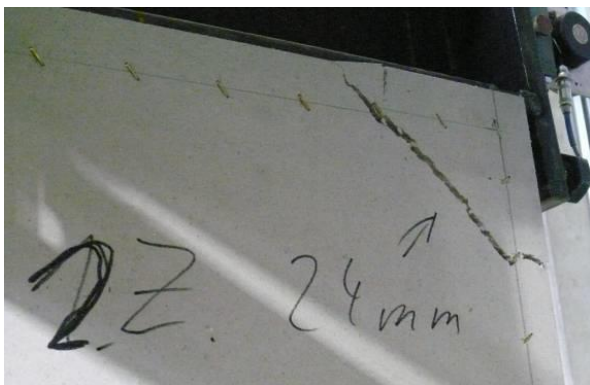


Bild 9.14 Primäres Zug-Versagen der Platte im Eckbereich. Versuch-Nr. GF-W2-12,5 H-1-1-1, Probe-Nr. 2. Quelle: VHT

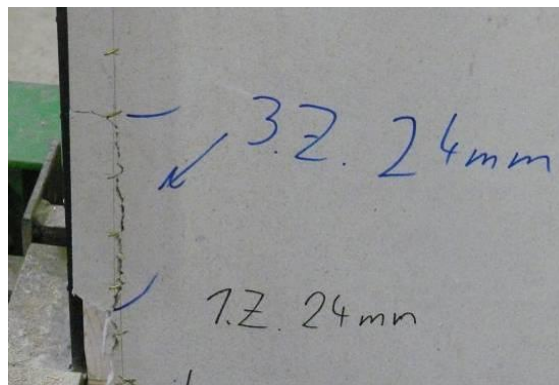


Bild 9.15 Sekundäres Versagen im Eckbereich mit zunehmenden Rissen entlang der Verbindungen. Versuch-Nr. GF-W2-12,5 H-1-1-1, Probe-Nr. 2. Quelle: VHT

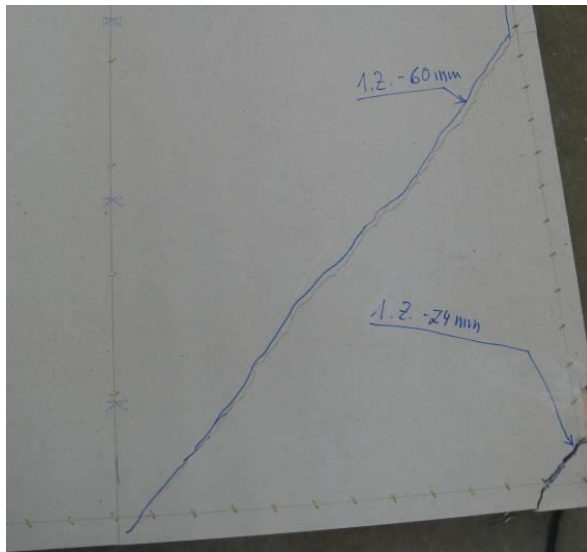


Bild 9.16 Tertiäres Versagen: Globaler Zugriss in der Gipsfaserplatte mit nachfolgendem Abfall der Kraft (1. Zyklus; -60,0 mm). Versuch-Nr. GF-W2-15,0 H-1-1-1, Probe-Nr. 1. Quelle: VHT



Bild 9.17 Verformtes Verbindungsmittel der einschnittigen Verbindung mit Ausbildung von 2 Fließgelenken (rot markiert). Der Klemmerrücken ist in die Platte hineingezogen worden. Versuch-Nr. GF-W2-15,0 H-1-1-1, Probe-Nr. 1. Quelle: VHT

### Gipsfaserplatten des Typs „GF-C1-I-W2“

Tabelle 9.2.5 Eintreten der Versagensmechanismen der zyklischen Untersuchungen an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Gipsfaserplatten des Typs „GF-C1-I-W2“ nach DIN EN 15382-2.

Versuch-Nr.	Art der Versagensform und Amplitude der zyklischen Beanspruchung			
	primär	sekundär	tertiär	quartär
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-2	Zugversagen Ecke (24,0 mm)	Schubversagen (24,0 mm)	Herausziehen + Bruch der Klammern (36,0 mm)	globales Zugversagen (36,0 mm)
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-1	Zugversagen Ecke (24,0 mm)	Schubversagen (24,0 mm)	Herausziehen + Bruch der Klammern (36,0 mm)	-
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-2-2	Zugversagen Ecke (24,0 mm)	Schubversagen (36,0 mm)	Herausziehen + Bruch der Klammern (36,0 mm)	-

Die beplankten Wandscheiben mit Auflast zeigten ein überwiegendes Versagen der Klammern in Form von Auszug der Klammern aus der Unterkonstruktion. Die Klemmerrücken der ausgezogenen Klammern wurden in der Platte versenkt, aber überwiegend nicht durchgezogen. Ein Kopfdurchzug der Klammern konnte vereinzelt beobachtet werden. Die Versagensmechanismen setzten sich mit zunehmender Amplitudenauslenkung von den Wandecken zu den Seitenmittelpunkten fort. In den Ecken kam es örtlich zu Plattenzugversagen und vereinzelt zu Schubversagen entlang der Verbindungsmittel.



Bild 9.18 Durch wiederholtes Plastizieren geschwächte und gebrochene Klammern. Versuch-Nr. GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-2, Probe-Nr. 1. Quelle: VHT



Bild 9.19 Auszug der Klammern aus der Unterkonstruktion. Versuch-Nr. GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-2, Probe-Nr. 2. Quelle: VHT

Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus Gipsfaserplatten des Typs „GF-C1-I-W2“ ohne Auflast zeigten ebenfalls ein überwiegendes Versagen der Klammern in Form von Auszug der Klammern aus der Unterkonstruktion. Die Klammerrücken der ausgezogenen Klammern wurden in der Platte versenkt, aber überwiegend nicht durchgezogen. Ein Kopfdurchzug der Klammern konnte wie bei gleichen Wandscheiben mit Auflast vereinzelt beobachtet werden. Die Versagensmechanismen setzten sich mit zunehmender Amplitudenauslenkung von den Wandecken zu den Seitenmittelpunkten fort. Vereinzelt konnte in den Ecken Plattenzugversagen und ein Schubversagen entlang der Klammern beobachtet werden.



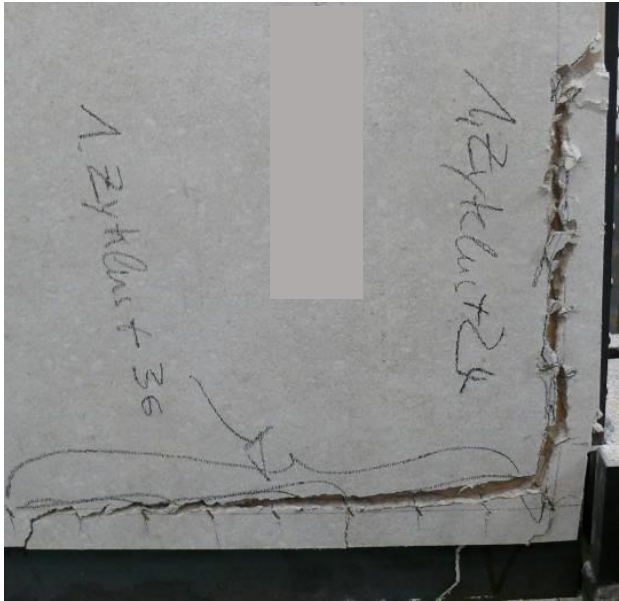


Bild 9.20 Schubversagen entlang der Verbindungsmittel im Eckbereich der Wand. Versuch-Nr. GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-1, Probe-Nr. 2. Quelle: VHT



Bild 9.21 Ausgezogene und durchgeknöpfte Klammern an der Randrippe. Versuch-Nr. GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-1, Probe-Nr. 2. Quelle: VHT

**Gipsfaserplatten des Typs „GF-I-W2-C1“**

Tabelle 9.2.6 Eintreten der Versagensmechanismen der zyklischen Untersuchungen an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Gipsfaserplatten des Typs „GF-W2“ nach DIN EN 15283-2.

Versuch-Nr.	Art der Versagensform und Amplitude der zyklischen Beanspruchung			
	primär	sekundär	tertiär	quartär
GF-I-W2-C1-12,5 H-1-2-2	Zugversagen Ecke (24,0 mm)	Schubversagen (24,0 mm)	Herausziehen + Bruch der Klammern (36,0 mm)	globales Zugversagen (48,0 mm)

Bei Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer einseitigen Beplankung aus Gipsfaserplatten des Typs „GF-W2-I-C1“ konnte kein Auszug der Verbindungsmittel aus den Rippen beobachtet werden. Einige der Klammern sind aufgrund wiederholter Verformung gebrochen. Es konnten keine durchgeknöpften Klammern beobachtet werden. Im Verlauf der zyklischen Beanspruchung kam es nach primären Plattenzugversagen in den Eckbereichen zu einem sekundären Schubversagen in den Eckbereichen entlang der Verbindungsmittellinie. Das Versagen setzte sich von den Wandecken zu den Mittelpunkten der Seiten hin fort.



Bild 9.22 Geschädigte Beplankung mit Zug- und Schubrisen des Versuchs mit Gipsfaserplatten des Typs „GF-I-W2-C1“. Versuch-Nr. GF-I-W2-C1-12,5 H-1-2-2, Probe-Nr. 1. Quelle: VHT



Bild 9.23 Sekundäres Schubversagen in der Ecke der Randrippe. Das Versagen setzt sich mit zunehmender Beanspruchung zu den Wandmittelpunkten fort. Versuch-Nr. GF-I-W2-C1-12,5 H-1-2-2, Probe-Nr. 1. Quelle: VHT

An den untersuchten Wandscheiben konnten die Versagensformen des rechnerischen Modells für statische Belastungen gefunden werden. Dabei konnte Beulen der Beplankung nur als Deformation erkannt werden. Beulen der Beplankung führte nicht ohne Vorschädigung der Platten zum Versagen. Die beiden weiteren Versagensformen des rechnerischen Modells, Versagen der Verbindung und Versagen der Platte auf Schub konnte festgestellt werden. Bei Gipsplatten wurde im Gegensatz zu Gipsfaserplatten ein Kopfdurchziehen der Klammerrücken wesentlich häufiger beobachtet. Bruch der Klammern und Auszug der Klammern aus der Unterkonstruktion hingegen konnte überwiegend bei Wandscheiben mit Beplankung aus Gipsfaserplatten beobachtet werden.

Für Gipsplatten des Typs „DF“ der Nenndicke 18,0 mm konnte nach Vorschädigung ein globales Zugversagen in diagonalen Richtung festgestellt werden. Dies wurde bei Platten gleichen Typs und geringerer Nenndicke nicht festgestellt. Begründung dafür ist, dass die lokale Verbindung mit zunehmender Plattendicke größere Tragfähigkeit und Duktilität erzielt (siehe Abschnitt 7). Der Decklagenkarton, der für die globale Zugfestigkeit der Gipsplatte mitbestimmend ist, ist aber bei allen Nenndicken gleich.

Das primäre Versagen im Eckbereich wird hinsichtlich der Tragfähigkeit der Wandscheibe nicht als relevant betrachtet, da nachfolgend die Tragfähigkeit der Wandscheibe ansteigt. Ohne eine Deformation nehmen die Verbindungen der Randrippe keine Belastung auf. Trotz eines sehr geringen Abstands der Verbindungsmittel konnte an den Verbindungsmittel in der Regel die Ausbildung mindestens eines Fließgelenks festgestellt werden.

Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse der Untersuchungen, dass die geringere Zugfestigkeit der gipsgebundenen Platten im rechnerischen Modell der Wandscheibe berücksichtigt werden sollte. Ebenso wurden Hinweise auf ein vom Schubfeld-Modell abweichendes rechnerisches Modell für Wandscheiben mit Beplankung aus gipsgebundenen Platten gefunden. Hinweise darauf sind unter anderem, dass das Versagen der Verbindungen ausgehend von den Ecken und

nicht, wie im Schubfeldmodell für ausschließlich randparallelen Schubfluss angenommen, konstant über den Plattenrand verteilt stattfindet. Ebenso der sich einstellende Zugriss bei den Wandscheiben mit Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DF“ der Nenndicke 18,0 mm deutet auf ein sich ausbildendes Fachwerkmodell mit Zug- und Druckstreben hin. Einen Überblick über verschiedene Modelle für die Bemessung von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise und Angaben zur möglichen Modellbildung für Wandscheiben kann [32] entnommen werden.

Da die hier vorliegende Publikation sich nicht grundsätzlich mit der Fragestellung der Anwendung verschiedener Bemessungsmodelle für Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankungen aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen auseinandersetzt, wird hier die Untersuchung der Eignung verschiedener Modelle nicht weiter betrachtet. Der Autor empfiehlt deshalb weitere Untersuchungen dazu durchzuführen, um im Sinne des erdbebensicheren Konstruierens geeignete Modelle zu finden.

### 9.3 Erkenntnisse zur Duktilität und Dämpfung

Da bei der Betrachtung der Untersuchungsmethoden festgestellt wurde, dass die Beurteilung der Fließverschiebung und Duktilität sehr vage definiert sind, werden nachfolgend die Untersuchungsergebnisse mit der in Abschnitt 6.3 entwickelten Methode ausgewertet. Ebenso werden die Ergebnisse der Dämpfung, wie in Abschnitt 6.5 beschrieben, aus dem gesamten Zyklus bestimmt.

Die Duktilität wird bis zum Erreichen eines Abbruchkriteriums betrachtet. DIN EN 12512 definiert dieses durch das Erreichen einer Tragfähigkeitsminderung von größer/gleich 20 % innerhalb eines Zyklenkollektivs (Zyklus a bis Zyklus c mit gleicher Amplitude). Da die Zuordnung eines Wertes für die Duktilität in Abhängigkeit von der Minderung des Tragwiderstandes geschieht, werden sowohl Zyklusduktilität als auch die Minderung des Tragwiderstandes in Bezug zur Energiedissipation betrachtet. Die Zyklusduktilität nimmt im Gegensatz zum Tragwiderstandsverhältnis im Verlauf der zyklischen Beanspruchung zu.

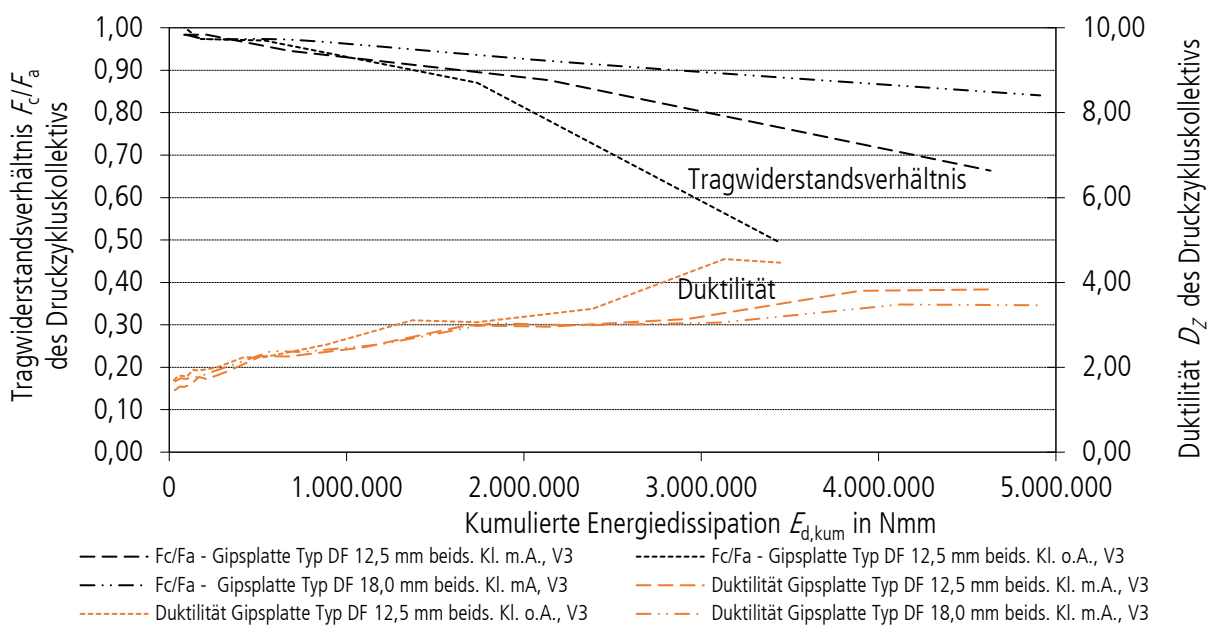


Bild 9.24 Exemplarisch ausgewählte Verläufe der Duktilität und des Tragwiderstandsverhältnisses in Abhängigkeit der Energiedissipation von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DF“. In der unteren Diagrammhälfte ist die Zyklusduktilität  $D_z$  abgebildet; oben das Tragwiderstandsverhältnis  $F_c/F_a$ .

Die Bestimmung der Duktilität erfolgt bei Unterschreiten eines Tragfähigkeitsverhältnisses von 0,8. Auf Grundlage dieses Verfahrens wurde die Duktilität der unterschiedlich beplankten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise ausgewertet. Die Werte für die Zyklusduktilität liegen zwischen 3,0 und 4,2. Innerhalb der Werkstoffgruppen sind leichte Unterschiede erkennbar. Gipsplatten des Typs „DFH2IR“, die aufgrund der höheren Rohdichte eine größere Steifigkeit und Lochleibungsfestigkeit als Platten des Typs „DF“ haben, erreichten geringfügig niedrigere Duktilitätswerte. Bei einseitig beplankten Wandscheiben kann eine etwas höhere Duktilität beobachtet werden. Dies resultiert aus der nicht symmetrischen Geometrie der Wandscheiben und führt zu einem Verwölben der Wandscheibe. Die Ecken der Zugdiagonale einseitig beplankter Wandscheiben werden zur beplankten Seite gezogen. Die gedrückten Ecken der entgegengesetzten Diagonale drücken sich von der beplankten Seite weg. Somit kann die Wand geringfügig der Last ausweichen. Wandscheiben, die ohne Auflast geprüft wurden, erreichten ebenfalls geringere Duktilitätswerte. Die Methode der Ermittlung des Duktilitätswerts aus dem Versuchsablauf erscheint hier sinnvoll, da man die Beurteilung ausschließlich anhand der im Versuch ermittelten Kennwerte vornimmt.

Die Dämpfung wurde im 3. Zyklus des Zyklenkollektivs gleicher Amplituden ermittelt. Somit bleibt die nur bei Erstbelastung auftretende plastische Deformation (und auch Energiedissipation) der Lochwandung unberücksichtigt. Die so

bestimmten Werte der Dämpfung sind als konservativ zu betrachten. Nachfolgend sind die Werte der Duktilität und Dämpfung, die in den Untersuchungen ermittelt wurden, zusammengestellt:

Tabelle 9.3.1 Duktilität  $D_z$  und Dämpfung  $\nu_{eq}$  der durchgeführten Untersuchungen an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit gipsgebundenen Plattenwerkstoffen als Beplankung.

Versuch Nr.	Werkstoff / Beplankung	Auflast	Duktilität $D_z$	Dämpfung $\nu_{eq}$	
				Bereich	mean <sub>Zyklus b</sub>
DF-12,5 H-1-2-1	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 12,5 mm beidseitige Beplankung	ohne	3,4	0,10 - 0,23	0,12
DF-12,5 H-1-2-2	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 12,5 mm beidseitige Beplankung	16 kN/m	3,4	0,12 - 0,15	0,14
DF-18,0 H-1-2-2	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 18,0 mm beidseitige Beplankung	16 kN/m	3,4	0,11 - 0,13	0,12
DFH2IR-12,5 H-1-2-2	Gipsplatte Typ DFH2IR Nenndicke 12,5 beidseitige Beplankung	16 kN/m	3,0	0,10 - 0,18	0,14
DFH2IR-12,5 H-1-1-2	Gipsplatte Typ DFH2IR Nenndicke 12,5 einseitige Beplankung	16 kN/m	3,3	0,11 - 0,18	0,13
DEFH1IR-12,5 H-1-1-1	Gipsplatte Typ DEFH1IR Nenndicke 12,5 einseitige Beplankung	ohne	-	0,09 – 0,20	0,12
GF-W2-12,5 H-1-1-1	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	ohne	-	0,09 – 0,11	0,10
GF-W2-15,0 H-1-1-1	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 Nenndicke 15,0 mm einseitige Beplankung	ohne	-	0,09 – 0,12	0,10
GF-C1-I-W2- 12,5 H-1-1-2	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	16 kN/m	3,8	0,09 - 0,16	0,12
GF-C1-I-W2- 12,5 H-1-1-1	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	ohne	3,3	0,07 - 0,11	0,09
GF-C1-I-W2- 12,5 H-1-2-2	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm beidseitige Beplankung	16 kN/m	3,5	0,11 - 0,15	0,13
GF-I-W2-C1- 12,5 H-1-2-2	Gipsfaserplatte Typ GF-I-W2-C1 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	16 kN/m	4,2	0,09 - 0,15	0,12



## 10 Eingliederung der Untersuchungsergebnisse in das Bemessungskonzept

### 10.1 Allgemeines

Die Bemessung von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus den hier untersuchten gipsgebundenen Plattenwerkstoffen erfolgt nach den Konzepten von DIN EN 1998-1-1 mit dem nationalen Anhang bzw. DIN 4149 und DIN EN 1995-1-1 mit dem zugehörigen nationalen Anhang. Mit dem Ziel, die Untersuchungsergebnisse im Kontext eines Bemessungskonzepts einzugliedern und zu bewerten, ist es notwendig, ein Konzept zur Eingliederung zu erstellen. Nachfolgend wird ein Konzept vorgestellt, mit dem dies möglich ist. Bei der Bestimmung der Tragfähigkeit von Wandscheiben nach DIN EN 1995-1-1 + NA wird auf eine Erhöhung des Abscherwiderstandes der Verbindungen aufgrund des Einhängeeffekts mit  $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$  und gemäß DIN EN 1995-1-1, 9.2.4.2(5) um 20 % verzichtet. Für die gipsgebundenen Plattenwerkstoffe werden dazu nachfolgende grundlegende Annahmen getroffen, um Bemessungswerte für die Tragfähigkeit zu bestimmen.

Tabelle 10.1.1 Eingangswerte zur Bestimmung der rechnerischen Bemessungswerte der Tragfähigkeit bei Erdbebenbeanspruchung nach DIN EN 1995-1-1 und DIN EN 1995-1-1/NA der verschiedenen gipsgebundenen Plattenwerkstoffe.

Plattentyp	Teilsicherheitsbeiwert	Modifikationsbeiwert	Lochleibungsfestigkeit	Zugfestigkeit	Schubfestigkeit
	$\gamma_M$	$k_{mod}$	$f_{h,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{t,90,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
DF	1,0	1,1	$3,9 \cdot d^{-0,60} \cdot t^{0,70}$	0,7	1,0
DFH2IR	1,0	1,1	$45 \cdot d^{-0,65}$	0,7	1,1
DEFH1IR	1,0	1,1	$60 \cdot d^{-0,85}$	0,9 (0,8)*	2,4 (2,0)*
GF-W2	1,0	1,1	$35 \cdot d^{-0,20} \cdot t^{0,10}$	2,3	3,5
GF-C1-I-W2	1,0	1,1	$127 \cdot d^{-0,70}$	2,2 (2,0)	2,3
GF-I-W2-C1	1,0	1,1	$7 \cdot d^{-0,70} \cdot t^{0,90}$	2,4	3,6 (3,5)

)\* Werte in Klammern bei unterschiedlichen Festigkeiten für Platten der Nenndicke 15,0 mm.

### 10.2 Bewertung der duktilen Eigenschaften nach dem Prinzip gleicher Formänderungsarbeit

Entsprechend den Ausführungen von Prof. Dr.Dr.h.c. Hugo Bachmann in der Veröffentlichung „Erdbebensicherung von Bauwerken – 2. überarbeitete Auflage“ [1] wird der Verhaltensbeiwert  $q$  und die Verschiebeduktilität  $\mu$  unter Berücksichtigung des nichtlinearen Verhaltens durch nachfolgende Beziehungen definiert. Der plastische Tragwiderstand  $F_y$  und der Bemessungswert der Tragfähigkeit nach DIN EN 1995-1-1 und DIN EN 1995-1-1/NA werden gleich gesetzt.

$$q = \frac{F_{el}}{F_y} = \frac{F_{f,el}}{F_{f,Rd}} = \frac{F_{v,el}}{F_{v,Rd}} \quad (10.1)$$

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = \frac{\Delta_{F_{f,u}}}{\Delta_{F_{f,Rd}}} = \frac{\Delta_{F_{v,u}}}{\Delta_{F_{v,Rd}}} \quad (10.2)$$

Grundlage des hier gewählten Vorgehens ist das Prinzip der gleichen Formänderungsarbeit. Der Ansatz auf Grundlage gleicher Verschiebungen liefert mit zunehmender Duktilität signifikant größere Verhaltensbeiwerte. Der Ansatz nach dem Prinzip der gleichen Formänderungsarbeit führt zu konservativeren Ergebnissen und wird für einen Frequenzbereich zwischen 2 Hz und 10 Hz empfohlen (siehe [1]). Für die Bestimmung des Verhaltensbeiwertes und der Verschiebeduktilität wurde ein bilineares Diagramm gewählt. Dieses setzt sich zusammen aus einem elastischen Anteil und einem plastischen Anteil.

Der elastische Anteil wurde der Steigung der Hüllkurve bis zum Erreichen der Streckgrenze angenähert und in Anlehnung an DIN EN 1995-1-1, Tabelle 7.1 für die einzelne Verbindung bestimmt. Die Streckgrenze wird definiert durch den Bemessungswert der Tragfähigkeit nach DIN EN 1995-1-1, DIN EN 1995-1-1/NAD und ggf. weitere bauaufsichtliche Regelungen (z.B. ETA oder AbZ).

Aus der Forderung des Prinzips der gleichen Formänderungsarbeit ergibt sich, dass die Flächen  $A_1$  (lineares Verhalten) und  $A_2$  (nichtlineares Verhalten) den gleichen Flächeninhalt besitzen (siehe Bild 10.1). Aufgrund der Annahme des bilinearen Diagramms mit einer Streckgrenze mit dem Bemessungswert der Tragfähigkeit nach DIN EN 1995-1-1, DIN EN 1995-1-1/NAD, ggf. weiteren Regelungen und einem größeren mittleren Tragwiderstand aus Prüfungen ergibt sich die Anforderung zur Definition eines Überfestigkeitsfaktors. Die Überfestigkeiten müssen im Rahmen einer Bemessung berücksichtigt werden. Für die Lastweiterleitung ist sicherzustellen, dass die Lasten bis zum Erreichen des mittleren Tragwiderstands aus Prüfungen aufgenommen werden können. Dies betrifft z.B. die Zug- und Schubverankerungen der Wandscheiben.

Als Überfestigkeitsfaktor  $\alpha_u$  wird das Verhältnis von mittlerem maximalen Tragwiderstand  $F_{t,max,mean}$  aus Versuchen und dem Bemessungswert der Tragfähigkeit  $F_{t,Rd}$  definiert. Der mittlere maximale Tragwiderstand  $F_{t,max,mean}$  wird aus der mittleren Hüllkurve (oberer Ast) gewonnen. Der Überfestigkeitsfaktor  $\alpha_u$  wird wie folgt definiert:

$$\alpha_u = \frac{F_{t,max,mean}}{F_{t,Rd}} \quad (10.3)$$

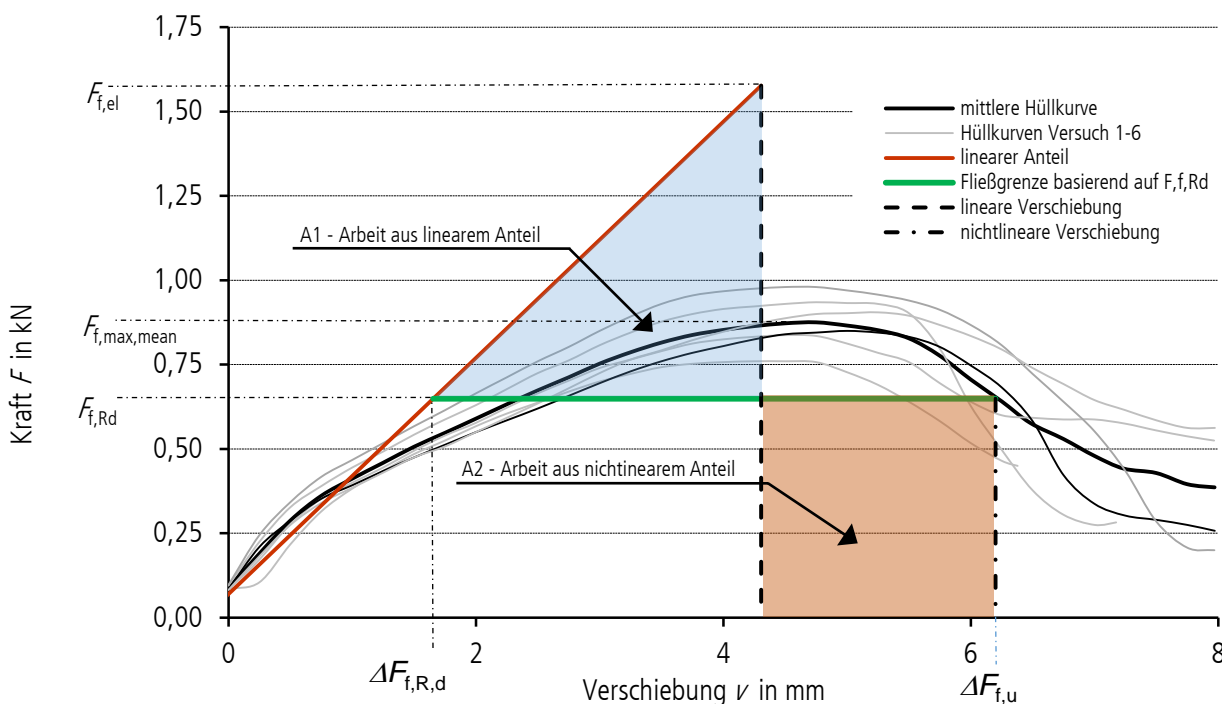


Bild 10.1 Definition der Eingangsgrößen zur Bestimmung des Verhaltensbeiwerts, des Überfestigkeitsfaktors und der Verschiebeduktilität anhand der mittleren Hüllkurve einer Verbindung aus Prüfungen an Scherkörpern. Als Beplankung wurden Gipsplatten des Typs DEFH1IR der Nenndicke 12,5 mm verwendet. Der Referenzwert des Tragwiderstands eines elastischen Systems  $F_{t,el}$  ist ebenfalls abgebildet.

Die Versuche an Scherkörpern und Wandscheiben werden auf Grundlage dieser Annahme ausgewertet. Nachfolgend sind sowohl die Ergebnisse für die einzelne Verbindung (lokal) am Scherkörper als auch die Ergebnisse am Bauteil Wandscheibe (global) zusammengestellt. Die verwendeten Bemessungsregeln zur Bestimmung der Tragfähigkeit nach DIN EN 1995-1-1 und DIN EN 1995-1-1/NA werden ebenfalls erläutert.



### 10.3 Duktile Eigenschaften von Scherkörpern

An den Proben mit Verbindungen von verschiedenen Plattenwerkstoffen mit einer Holzunterkonstruktion wurden nachfolgende Verhaltensbeiwerte, Verschiebeduktilitäten und Überfestigkeiten bestimmt. Die Abscherwiderstände wurden nach DIN EN 1995-1-1, Abschnitt 8.2.2 Gleichung (8.6) bestimmt (siehe Abschnitt 7.1).

Eine Erhöhung der Tragfähigkeit der einschnittigen Verbindung aufgrund des Auszieh Widerstandes des Verbindungsmittels wurde nicht berücksichtigt. Die Versuche haben gezeigt, dass bei dem gewählten Verbindungsmittel sowohl der Rücken der Klammern durchgezogen als auch der beharzte Schaft aus der Unterkonstruktion herausgezogen wird. Die angenommenen Bemessungswerte für die einschnittige Verbindung können Tabelle 7.1.1 und Tabelle 7.1.2 entnommen werden.

An Scherkörpern mit Beplankung aus Gipsfaserplatten des Typs „GF-C1-I-W2“ wurde in der ersten Versuchsreihe das Kriterium zum Beenden der Versuche (siehe Abschnitt 6.4) nicht erreicht. Daher wurden zwei weitere Versuche zur Bestimmung eines ausreichenden oberen Astes der Hüllkurve durchgeführt. Anhand dieser Versuche konnten Ergebnisse erzielt werden, die sich in die Betrachtung der untersuchten Gipsfaserplatten gut einfügen.

An allen bewerteten Verbindungen von gipsgebundenem Plattenwerkstoff und Holzunterkonstruktion konnte grundsätzlich ein gutmütiges Verhalten mit einem deutlich erkennbaren Fließbereich festgestellt werden. Verbindungen mit Gipsfaserplatten erzielen größere Verhaltensbeiwerte als Gipsplatten. Dies ist auf zwei wesentliche Unterschiede zu Gipsplatten zurückzuführen.

- Gipsfaserplatten haben eine höhere Lochleibungsfestigkeit und es bilden sich an der einschnittigen Verbindung zwei Fließgelenke aus
- Durch den gleichmäßig über die Plattendicke verteilten Faseranteil der Gipsfaserplatten erlangt die Lochwandung der Platte als Lagerung des Verbindungsmittels eine größere Duktilität. Ein Ausbruch an Gips ist deutlich geringer. Durch die langen Fasern ist die Lochwandung mit der umgebenden Platte besser vernetzt als die Lochwandung von Gipsplatten. Gipsplatten verfügen über Deckkartone und eine nur gering faserverstärkte Gipsmatrix. Der Aufbau von Gipsplatten ist im Vergleich zu Gipsfaserplatten nicht homogen. Grundlagen zu den mechanischen Kennwerten und Herstellungsverfahren sind in [15] zusammengestellt.

Tabelle 10.3.1 Verhaltensbeiwerte, Verschiebeduktilitäten und Überfestigkeitsfaktoren von einschnittigen Verbindungen mit Gipsplatten nach DIN EN 520 und Holzunterkonstruktion. Verbindungsmittel: Klammer 1,5 mm x 50 mm elektrolytisch verzinkt und geharzt.

	Versuch-Nr.				
	DF-12,5 H-3-2-1	DF-18,0 H-3-2-1	DEFH1IR-12,5 H-3-2-1	DFH2IR-12,5 H-3-2-1	DFH2IR-15,0 H-3-2-1
Verhaltensbeiwert $q$	2,31	2,17	2,43	2,25	2,21
Überfestigkeitsfaktor $\alpha_u$	1,32	1,16	1,35	1,38	1,46
Verschiebeduktilität $\mu$	3,17	2,85	3,75	3,04	3,05

Tabelle 10.3.2 Verhaltensbeiwerte, Verschiebeduktilitäten und Überfestigkeitsfaktoren von einschnittigen Verbindungen mit Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2 und Holzunterkonstruktion. Verbindungsmittel: Klammer 1,5 mm x 50 mm elektrolytisch verzinkt und geharzt.

	Versuch-Nr.			
	GF-W2-12,5 H-3-2-1	GF-W2-15,0 H-3-2-1	GF-C1-I-W2-12,5 H-3-2-1	Erweiterte Zyklen GF-C1-I-W2-12,5 H-3-2-1-EZ
Verhaltensbeiwert $q$	3,76	4,11	2,79*	4,17
Überfestigkeitsfaktor $\alpha_u$	1,99	1,62	1,73*	1,56
Verschiebeduktilität $\mu$	9,07	9,74	4,56*	10,51

)\* Das Ende der zyklischen Versuche wurde nicht erreicht, vgl. Abschnitt 6.4.

## 10.4 Duktile Eigenschaften von Wandscheiben

Die Bestimmung der duktilen Eigenschaften der mit gipsgebundenen Plattenwerkstoffen beplankten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise erfolgt auf Grundlage des bilinearen Verhaltens entsprechend der ermittelten Bemessungswerte nach DIN EN 1995-1-1, Abschnitt 9.2.4.2 und DIN EN 1995-1-1/NA, Abschnitt NCI zu 9.2.4.2. Die längenbezogene Beanspruchbarkeit der Wandscheibe wird nach folgender Formel bestimmt.

$$f_{v,0,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} k_{v,1} \cdot F_{f,Rd} / s \\ k_{v,1} \cdot k_{v,2} \cdot f_{t,Rd} \cdot t \\ k_{v,1} \cdot k_{v,2} \cdot f_{v,Rd} \cdot t \cdot \frac{t \cdot 35}{b_{net}} \end{array} \right. \quad (10.4)$$

mit:

- $f_{v,0,Rd}$  Bemessungswert der rippenrandparallelen längenbezogenen Beanspruchbarkeit der Wandscheibe.  
 $k_{v,1}$  Beiwert zur Berücksichtigung der Anzahl an verbundenen Plattenrändern auf der Unterkonstruktion. Für allseitig schubsteif verbundene Plattenränder ist  $k_{v,1} = 1,0$ .  
 $k_{v,2}$  Beiwert zur aus dem Abstand von Rippenachsen und Beplankungsmittelflächen und aus diskontinuierlichen und rechtwinklig zu den Rippenachsen gerichteten Kräften resultierenden zusätzlichen Beanspruchungen der Beplankung. Für beidseitige Beplankung ist  $k_{v,2} = 0,5$ ; für einseitige Beplankung ist  $k_{v,2} = 0,33$ .  
 $F_{f,Rd}$  Bemessungswert der Beanspruchbarkeit auf Abscheren eines einzelnen Verbindungsmittels.  
 $s$  Abstand der Verbindungsmittel auf der Randrippe.  
 $t$  Plattendicke.  
 $f_{t,Rd}$  Bemessungswert der geringeren Zugfestigkeit.  
 $f_{v,Rd}$  Bemessungswert der Schubfestigkeit.  
 $b_{net}$  Lichter Abstand zwischen den Pfosten.

Aus der längenbezogenen Beanspruchbarkeit der Wandscheibe wird die horizontale Tragfähigkeit der Wandscheibe bestimmt.

$$F_{v,Rd} = f_{v,0,Rd} \cdot b \cdot c_i \quad (10.5)$$

Tabelle 10.4.1 Bemessungswerte der Tragfähigkeit  $F_{v,Rd}$  von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Gipsplatten nach DIN EN 520.

Versuch Nr.	Werkstoff / Beplankung	Verbindungsmittel	Verbindungsmittelabstand	Bemessungswert der Tragfähigkeit $F_{v,Rd}$ in kN
DF-12,5 H-1-2-1	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 12,5 mm beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	24,06
DF-12,5 H-1-2-2	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 12,5 mm beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	24,06

Fortsetzung Tabelle 10.4.1

Versuch Nr.	Werkstoff / Beplankung	Verbindungsmittel	Verbindungsmittel- abstand	Bemessungswert der Tragfähigkeit $F_{v,Rd}$ in kN
DF-18,0 H-1-2-2	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 18,0 mm beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	28,88
DFH2IR-12,5 H-1-2-2	Gipsplatte Typ DFH2IR Nenndicke 12,5 beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	24,06
DFH2IR-12,5 H-1-1-2	Gipsplatte Typ DFH2IR Nenndicke 12,5 einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	7,94
DEFH1IR-12,5 H-1-1-1	Gipsplatte Typ DEFH1IR Nenndicke 12,5 einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	10,21

Die der Tabelle 10.4.1 und der Tabelle 10.4.2 zugrunde gelegte Geometrie kann Abschnitt 5.7, Bild 5.8, entnommen werden. Auf Basis der genannten Abmessungen werden die Bemessungswerte der horizontalen Tragfähigkeit der Wandscheiben in Holzrahmenbauweise bestimmt.

Tabelle 10.4.2 Bemessungswerte der Tragfähigkeit  $F_{v,Rd}$  von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2.

Versuch Nr.	Werkstoff / Beplankung	Verbindungsmittel	Verbindungsmittel- abstand	Bemessungswert der Tragfähigkeit $F_{v,Rd}$ in kN
GF-W2-12,5 H-1-1-1	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	26,09
GF-W2-15,0 H-1-1-1	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 Nenndicke 15,0 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	31,31
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-2	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	20,20
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-1	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	20,20
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-2-2	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	61,22
GF-I-W2-C1-12,5 H-1-2-2	Gipsfaserplatte Typ GF-I-W2-C1 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 45	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	27,23

Gemäß den in Abschnitt 10.3 beschriebenen Grundlagen für die Beurteilung nach dem Prinzip der gleichen Formänderungsarbeit werden die Untersuchungen an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen durchgeführt. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Untersuchungen zusammen-

gestellt. Dabei wird auf die wesentliche Abhängigkeit der Ergebnisse von der Größe der Bemessungswerte hingewiesen. Hohe Bemessungswerte führen zu einem geringeren Verhaltensbeiwert und einem geringeren Überfestigkeitsfaktor. Dies gilt auch für die Ergebnisse an Scherkörpern.

Tabelle 10.4.3 Verhaltensbeiwerte, Verschiebeduktilitäten und Überfestigkeitsfaktoren der untersuchten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Gipsplatten nach DIN EN 520 und Holzunterkonstruktion. Verbindungsmittel: Klammer 1,5 mm x 50 mm elektrolytisch verzinkt und geharzt.

	Versuch-Nr.					
	DF-12,5 H-1-2-1	DF-12,5 H-1-2-2	DF-18,0 H-1-2-2	DFH2IR-12,5 H-1-2-2	DFH2IR-12,5 H-1-1-2	DEFH1IR-12,5 H-1-1-1
Verhaltensbeiwert $q$	2,17	2,45	2,29	2,93	4,66	5,14
Überfestigkeitsfaktor $\alpha_u$	1,27	1,34	1,18	1,66	2,72	4,15
Verschiebeduktilität $\mu$	2,88	3,52	3,14	4,83	11,63	13,71

Infolge des Einflusses der Vorgaben zur Bestimmung des Bemessungswertes der Schubfestigkeit nach DIN EN 1995-1-1 + NA (Berücksichtigung des geringsten Wertes der Schub- und Zugfestigkeit) kommt es innerhalb der Gruppe der Gipsplatten nach DIN EN 520 zu starken Schwankungen bezüglich des Verhaltensbeiwerts und des Überfestigkeitsfaktors. Die Verschiebeduktilität wird davon ebenfalls berührt. Die Verhaltensbeiwerte liegen zwischen 2,17 und 5,14, der Überfestigkeitsfaktor zwischen 1,18 und 4,15. Gründe für diese starke Schwankung innerhalb einer Gruppe ähnlicher Platten werden in Abschnitt 13 und Abschnitt 9.2 erläutert.

Tabelle 10.4.4 Verhaltensbeiwerte, Verschiebeduktilitäten und Überfestigkeitsfaktoren der untersuchten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2 und Holzunterkonstruktion. Verbindungsmittel: Klammer 1,5 mm x 50 mm elektrolytisch verzinkt und geharzt.

	Versuch-Nr.					
	GF-W2-12,5 H-1-1-1	GF-W2-15,0 H-1-1-1	GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-2	GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-1	GF-C1-I-W2-12,5 H-1-2-2	GF-I-W2-C1-12,5 H-1-2-2
Verhaltensbeiwert $q$	3,91	3,32	4,44	4,01	3,21	3,83
Überfestigkeitsfaktor $\alpha_u$	2,46	1,97	3,39	3,39	2,11	2,77
Verschiebeduktilität $\mu$	8,75	6,16	10,34	8,55	5,92	8,85

Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2 zeigen ein deutlich einheitlicheres Bild. Die Verhaltensbeiwerte liegen zwischen 3,21 und 4,44; Überfestigkeitsfaktoren zwischen 1,97 und 3,39. Damit ist davon auszugehen, dass Wandscheiben mit einer Beplankung aus Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2 unter einer Erdbebenbelastung ein höheres Maß an Beanspruchbarkeit haben als Gipsplatten nach DIN EN 520. Dem muss bei der Wahl der zur Gebäudeaussteifung notwendigen Wandscheiben Rechnung getragen werden.



## 11 Bewertung der duktilen Eigenschaften der Wandscheiben auf Grundlage der Kapazitätsspektrum-Methode

Zur Verifizierung der in Abschnitt 10.2, Abschnitt 10.3 und Abschnitt 10.4 bestimmten Verhaltensbeiwerte  $q$  und Überfestigkeitsfaktoren  $\alpha_u$  dient die Bewertung der Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit der Kapazitätsspektrum-Methode. Bei Bewertung mit der Kapazitätsspektrum-Methode ist eine Berücksichtigung der Dämpfung und des nichtlinearen Verhaltens möglich. Das Prinzip der gleichen Formänderungsarbeit berücksichtigt lediglich das nichtlineare Verhalten.

Durch den Verhaltensbeiwert  $q$  wird nichtlineares Materialverhalten in einer Bemessung nach dem Antwortspektrenverfahren gemäß EN 1998-1, Abschnitt 3.2.2.5 pauschal berücksichtigt. Es erfolgt eine Abminderung des elastischen Antwortspektrums durch den Wert  $q$ . Der Verhaltensbeiwert  $q$  wird von Bachmann [1] definiert als Verhältnis der elastischen Reaktionskraft im System zur Reaktionskraft des nichtlinearen Systems.

$$q = \frac{R_{el}}{R_{nl}} \quad (11.1)$$

mit:

$R_{el}$  Reaktionskraft des elastischen Systems.

$R_{nl}$  Reaktionskraft des nichtlinearen Systems.

Zum nichtlinearen System wird die viskose Dämpfung des Systems hinzugefügt. Das gedämpfte System wird durch die Ermittlung eines gedämpften Antwortspektrums nach EN 1998-1, Abschnitt 3.2.2.2 bestimmt. Die viskose Dämpfung  $\xi$  wird auf Basis der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen gewählt. Somit ergibt sich für den Verhaltensbeiwert eine um den Dämpfungsanteil erweiterte Gleichung.

$$q = \frac{R_{el}}{R_{nl+\xi}} \quad (11.2)$$

mit:

$R_{el}$  Reaktionskraft des elastischen Systems.

$R_{nl+\xi}$  Reaktionskraft des gedämpften nichtlinearen Systems.

Die Kapazitätsspektrum-Methode stellt die Kapazität eines Bauwerks den Anforderungen aus seismischer Belastung gegenüber. Die Verläufe der Kapazität und der Belastung werden in einem Spektralbeschleunigungs-Spektralverschiebungs-Diagramm aufgetragen. Aus dem Schnittpunkt beider Verläufe ergibt sich der „Performance Point“. Er gibt die bei einem Bemessungsbeben zu erwartenden Verschiebungen und Beschleunigungen an.

Die Kapazität der Wandscheiben wird als Kapazitätskurve aus zyklischen Prüfungen nach EN 12512 abgebildet. Die Kapazitätskurve basiert auf dem Belastungsanteil der Hüllkurve im Druckbereich (oberer Ast) der durchgeführten zyklischen Untersuchungen. Aus den Prüfungen wurde eine mittlere Belastungs-Hüllkurve im Druckbereich ermittelt. Dieser Hüllkurventeil entspricht der Kapazitätskurve. Die elastische Anfangssteifigkeit wurde so gewählt, dass beim Erreichen des Bemessungswertes der Tragfähigkeit ein Schnittpunkt mit der Kapazitätskurve entsteht. Getroffene Annahmen für die Untersuchung mit der Kapazitätsspektrum-Methode können Anhang D entnommen werden.

Als seismische Belastung wurde das elastische Antwortspektrum aus EN 1998-1, Abschnitt 3.2.2.2 gewählt. Durch Berücksichtigung der in den Versuchen ermittelten viskosen Dämpfung wird nach EN 1998-1, 3.2.2.2 (3) das gedämpfte Antwortspektrum bestimmt. Die Dämpfung wurde im 3. Zyklus eines Zyklenkollektivs bestimmt. Eine plasti-

sche Deformation der Lochwandung und ein Großteil der Reibung wurden so nicht berücksichtigt. Eine Berücksichtigung der Deformation der Lochwandung und der Reibung führt zu einer größeren viskosen Dämpfung und verbessert das Tragverhalten unter Erdbebenbeanspruchung. Der Dämpfungskorrekturbeiwert  $\eta$  wurde nach folgender Gleichung bestimmt:

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \geq 0,55 \quad (11.3)$$

Aus den Eingangswerten zur Ermittlung des Antwortspektrums wurde ein Spektralbeschleunigungs-Perioden-Diagramm des äquivalenten Einmassenschwingers bestimmt. Die Wahl der einzelnen Eingangswerte für die Ermittlung der Spektralbeschleunigung  $S_a$  und das Diagramm kann Anhang D entnommen werden.

Da sich die einwirkenden Belastungen aus den beschleunigten Massen des Gebäudes generieren, werden die Massen bis zum Erreichen des Bruchs gesteigert. Die Bruchlast ist bei konstanter Steigerung der Massen durch den letzten Schnittpunkt der Kapazitätsspektrum mit dem gedämpften Antwortspektrum (Performance Point) gekennzeichnet. Dabei wird das gedämpfte nichtlineare Verhalten berücksichtigt.

Im Folgenden wird exemplarisch an einem Typ der hier untersuchten Wandscheiben eine Bemessung mit der Kapazitätsspektrum-Methode durchgeführt, um das Vorgehen zu verdeutlichen. Es wurde eine Wandscheibe in Holzrahmenbauweise mit einer beidseitigen Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DF“ der Nenndicke 12,5 mm und Klammern mit den Abmessungen 1,5x50 mm ohne Auflast gewählt (Versuch-Nr. DF-12,5 H-1-2-1).

Das elastische Antwortspektrum mit einer Dämpfung von 5 % wird als Funktion der Spektralverschiebung  $S_d$  in Abhängigkeit von der Spektralbeschleunigung  $S_a$  und der Grundschwingzeit  $T$  des äquivalenten Einmassenschwingers (EMS) abgebildet. Hierzu wurde die Spektralverschiebung mit folgender Funktion bestimmt:

$$S_{d,i} = \frac{S_{a,i} \cdot T_i}{4 \cdot \pi^2} = \frac{S_{a,i}}{\omega_i^2} \quad (11.4)$$

mit:

$S_{d,i}$  Spektralverschiebung der i-ten Grundschwingzeit des äquivalenten EMS.

$S_{a,i}$  Spektralbeschleunigung der i-ten Grundschwingzeit des äquivalenten EMS.

$T_i$  i-te Grundschwingzeit des äquivalenten EMS.

Es ergab sich ein Spektralbeschleunigung-Spektralverschiebungs-Diagramm, welches Anhang D zu entnehmen ist.

Um das Kapazitätsspektrum der Wandscheibe zu bestimmen, wurde die Kapazitätskurve in spektrale Beschleunigungen und spektrale Verschiebungen transformiert.



Dies erfolgte mittels eines der Eigenform proportionalen Lastansatzes.

$$S_{a,i} = \frac{F_{b,i}}{m_{j,eff}} \quad (11.5)$$

$$S_{d,i} = \frac{\Delta_{Bezug,i}}{|\beta_j| \cdot \phi_{j,Bezug}} \quad (11.6)$$

mit:

$i$	Index des Verformungszustands.
$j$	Index der beim Lastansatz zugrundegelegten Modalform.
$F_{b,i}$	Fundamentschub im i-ten Verformungszustand.
$m_{j,eff}$	effektive Masse der Modalform „j“.
$\Delta_{Bezug,i}$	Verschiebung des Bezugspunkts im Verformungszustand „i“.
$\beta_j$	Anteilsfaktor der Modalform „j“.
$\Phi_{j,Bezug}$	Bezugspunktordinate des normierten Eigenvektors der Modalform „j“.

Für die Bemessung der geschosshohen Wandscheibe in Holzrahmenbauweise wurde zugrunde gelegt, dass lediglich eine Modalform existiert. Es wurde die effektive Masse der Modalform bis zum Erreichen des Bruchs gesteigert. In Anhang D sind die erreichten effektiven Massen der Modalform der untersuchten Wandscheibentypen zusammengestellt.

Nachfolgend ist der Performance Point einer Wandscheibe in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DF“ exemplarisch abgebildet. Dieser ergibt sich aus dem Schnittpunkt des gedämpften elastischen Antwortspektrums mit der Kapazitätskurve.

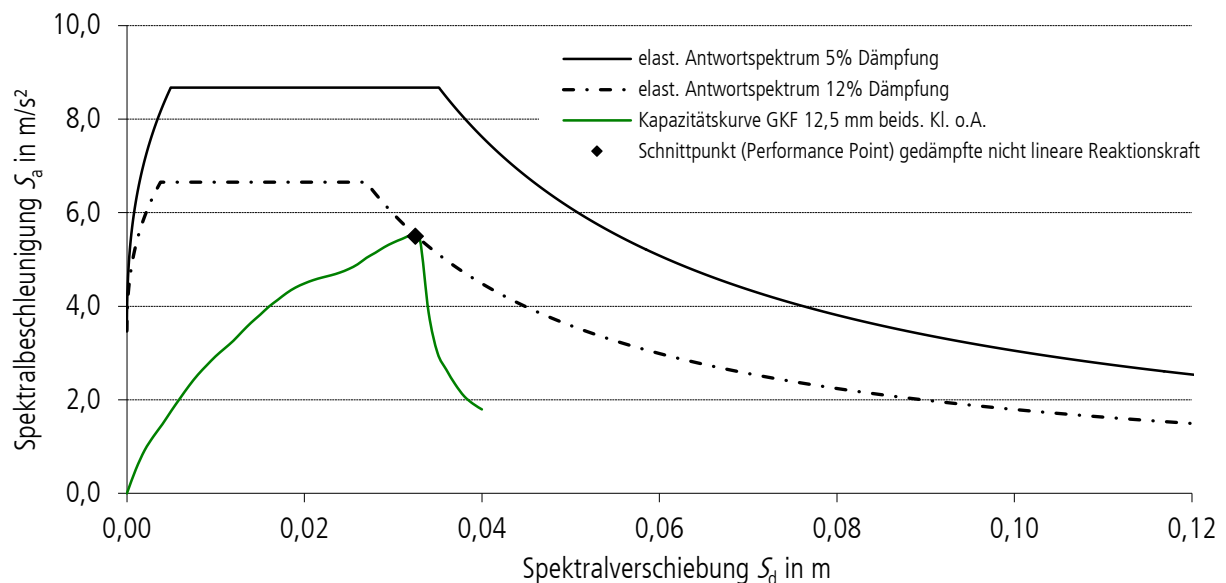


Bild 11.1 Elastisches Antwortspektrum mit 5 % Dämpfung und elastisches Antwortspektrum mit 12 % Dämpfung der Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit beidseitiger Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DF“ ohne Auflast (o.A.) unter Berücksichtigung der maximalen effektiven Masse der Modalform.

Der Performance Point gibt an, wie groß die Beschleunigung und Verschiebung des gedämpften nichtlinearen Systems ist. Aus der Beschleunigung  $S_{a,performance}$  und der effektiven Masse der Modalform  $m_{i,eff}$  wird die wirkende Kraft am Performance Point  $F_{performance}$  bestimmt. Die Kraft  $F_{performance}$  entspricht der gedämpften nichtlinearen Reaktionskraft  $R_{nl+\xi}$  des Systems. Es ergibt sich nachfolgende Bedingung:

$$R_{nl+\xi} = F_{performance} \quad (11.7)$$

mit:

$R_{nl+\xi}$  Reaktionskraft des gedämpften nichtlinearen Systems.  
 $F_{performance}$  wirksame Kraft bei Erreichen des Performance Point.

Für die Kraft  $F_{performance}$ , die auf die Wandscheibe einwirkt, ergibt sich:

$$F_{performance} = S_{a,performance} \cdot m_{i,eff} \quad (11.8)$$

Zur Bestimmung des Verhaltensbeiwerts  $q$  wird unter Berücksichtigung der gewählten effektiven Masse, der elastischen Steifigkeit  $K_{el}$  und dem mit 5% gedämpften elastischen Antwortspektrum die elastische Reaktionskraft bestimmt. Diese ergibt sich aus dem Schnittpunkt des elastischen Verhaltens und dem elastischen Antwortspektrum.

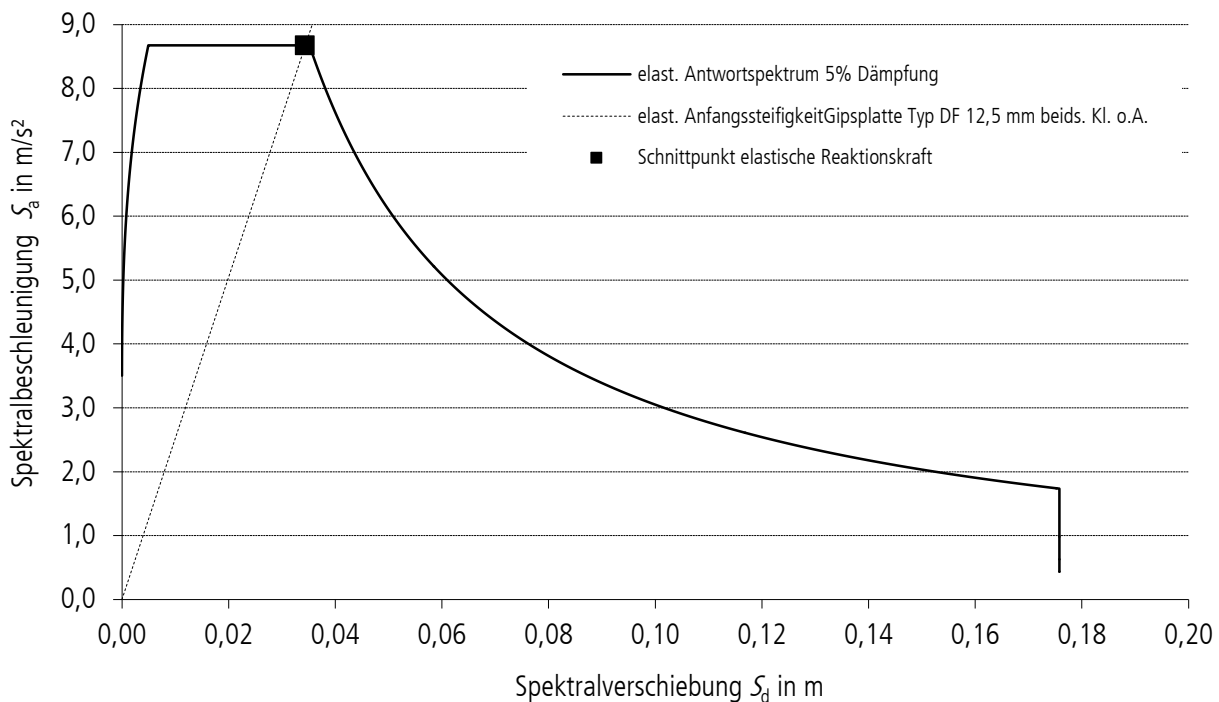


Bild 11.2 Elastisches Antwortspektrum der Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit beidseitiger Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DF“ unter Berücksichtigung der maximalen effektiven Masse der Modalform.

Aus den im Schnittpunkt wirkenden Beschleunigungen ergibt sich die elastische Reaktionskraft  $R_{el}$ .

$$R_{el} = S_{a,el} \cdot m_{i,eff} \quad (11.9)$$

Es ergibt sich der zugehörige Verhaltensbeiwert  $q$ .

$$q = \frac{R_{el}}{R_{nl+\xi}} = \frac{S_{a,el} \cdot m_{i,eff}}{S_{a,performance} \cdot m_{i,eff}} = \frac{S_{a,el}}{S_{a,performance}} \quad (11.10)$$

Da die Definition des Verhaltensbeiwerts keinen Bezug zu einem Bemessungswert der Tragfähigkeit nach DIN EN 1995-1-1 + NA bestimmt hat, wurde dies durch die Annahme elastisch-idealplastischen Verhaltens in die Kapazitätsspektrum-Methode eingefügt. Dazu wurde der Bemessungswert der Tragfähigkeit als Fließgrenze betrachtet. Fließen konnte bis zum Schnittpunkt mit dem abfallenden Ast der Kapazitätskurve nach überschreiten von  $F_{max}$  erfolgen oder bis zur Verschiebung bei Erreichen des Performance Point's.

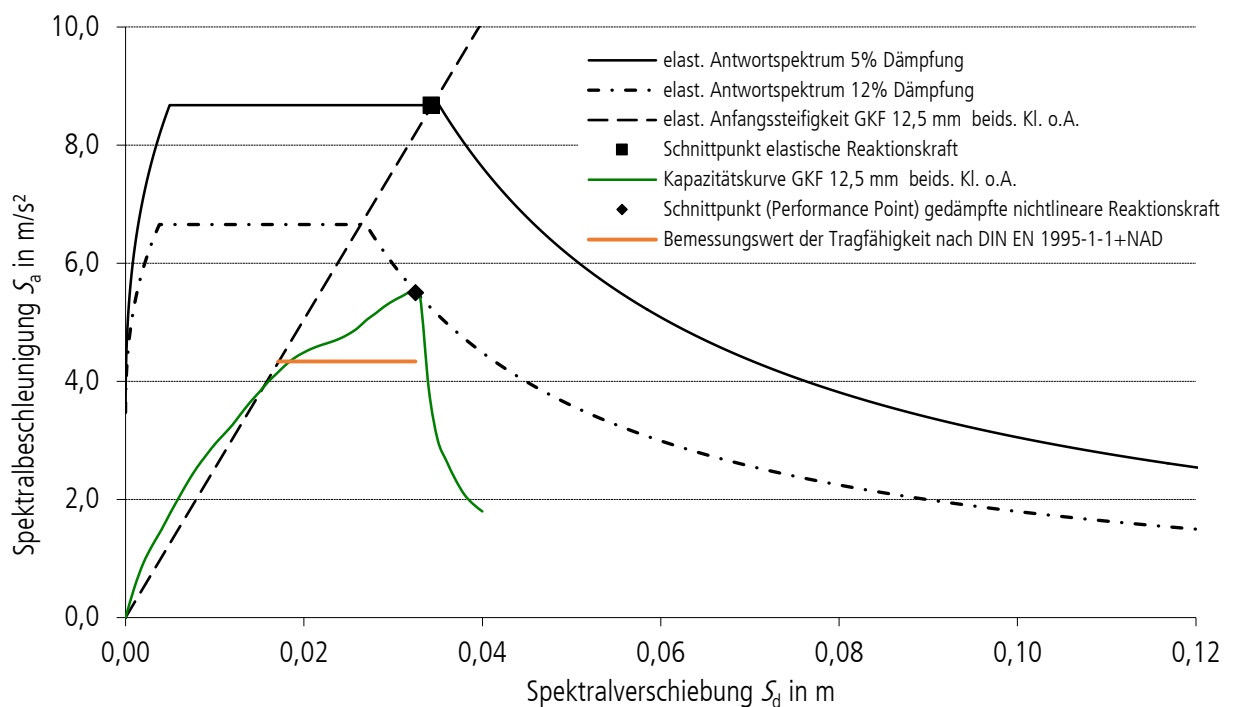


Bild 11.3 Elastisches Antwortspektrum mit 5 % Dämpfung und elastisches Antwortspektrum mit 12 % Dämpfung der Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit beidseitiger Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DF“ ohne Auflast (o.A.) unter Berücksichtigung der maximalen effektiven Masse der Modalform.

Um den Bemessungswert im Rahmen der Bewertung zu berücksichtigen, wird in der hier vorliegenden Publikation der Verhaltensbeiwert unter der Berücksichtigung der Bemessungsregeln nun wie folgt definiert:

$$q = \frac{R_{el}}{F_{v,Rd}} \quad (11.11)$$

Aufgrund der Annahme eines elastisch-idealplastischen Modells wird es erforderlich, den bis zum Erreichen des Performance Point's maximal erreichten Tragwiderstand der Kapazitätskurve zu berücksichtigen. Dies geschieht durch den Überfestigkeitsfaktor  $\alpha_u$ . Dieser ist durch folgende Formel definiert:

$$\alpha_u = \frac{F_{v,R \text{ Versuch, max}}}{F_{v,Rd}} \quad (11.12)$$

Für die untersuchten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise ergeben sich nachfolgende Ergebnisse:

Tabelle 11.1.2 Ermittlung der Verhaltensbeiwerte und Überfestigkeitsfaktoren von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus Gipsplatten nach DIN EN 520. Die Werte wurden nach der Kapazitätsspektrum-Methode bestimmt.

		Beplankung					
		DF-12,5 H-1-2-1	DF-12,5 H-1-2-2	DF-18,0 H-1-2-2	DFH2IR-12,5 H-1-2-2	DFH2IR-12,5 H-1-1-2	DEFH1IR-12,5 H-1-1-1
<b>Eingangswerte</b>							
elastische Steifigkeit	$K_{el}$ [N/mm]:	1.400	1.400	1.400	2.500	2.000	3.500
Bemessungswert der Tragfähigkeit nach EN 1995-1-1 + NAD	$F_{v,Rd}$ [kN]:	24,06	24,06	28,88	24,06	7,94	10,21
maximaler Tragwiderstand der Kapazitätskurve	$F_{v,R, Versuch, max}$ [kN]:	30,53	31,74	34,17	39,94	21,60	42,40
<b>elastische Reaktion</b>							
Beschleunigung Schnittp. elastisch	$S_{a,el}$ [m/s <sup>2</sup> ]:	8,68	8,00	7,24	8,68	8,68	8,68
Verschiebung Schnittp. elastisch	$S_{d,el}$ [m]:	0,034	0,038	0,042	0,028	0,020	0,016
elastische Reaktionskraft	$R_{el}$ [kN]:	<b>48,15</b>	<b>53,57</b>	<b>59,04</b>	<b>69,49</b>	<b>39,04</b>	<b>55,30</b>
<b>gedämpfte nichtlineare Reaktion</b>							
angenommene viskose Dämpfung	$v_{eq}$ [%]:	12	14	12	12	14	12
Beschleunigung Schnittp. gedämpft nichtlinear	$S_{a, nl+\xi}$ [m/s <sup>2</sup> ]:	5,50	4,45	3,80	4,90	4,75	6,65
Verschiebung Schnittp. gedämpft nichtlinear	$S_{d, nl+\xi}$ [m]:	0,033	0,036	0,048	0,033	0,036	0,023
<b>Verhaltensbeiwert und Überfestigkeitsfaktor bezogen auf den Bemessungswert nach EN 1995-1-1 + NAD, Gleichung (10.11) und (10.12)</b>							
Verhaltensbeiwert	$q$ :	<b>2,00</b>	<b>2,22</b>	<b>2,04</b>	<b>2,88</b>	<b>4,92</b>	<b>5,42</b>
Überfestigkeitsfaktor	$\alpha_u$ :	<b>1,27</b>	<b>1,34</b>	<b>1,18</b>	<b>1,66</b>	<b>2,72</b>	<b>4,15</b>

Tabelle 11.1.3 Ermittlung der Verhaltensbeiwerte und Überfestigkeitsfaktoren von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2. Die Werte wurden nach der Kapazitäts-spektrum-Methode bestimmt.

		Beplankung					
		GF-W2-12,5 H-1-1-1	GF-W2-15,0 H-1-1-1	GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-2	GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-1	GF-C1-I-W2-12,5 H-1-2-2	GF-I-W2-C1-12,5 H-1-2-2
<b>Eingangswerte</b>							
elastische Steifigkeit	$K_{el}$ [N/mm]:	3.500	3.500	3.600	3.600	7.000	3.500
Bemessungswert der Tragfähigkeit nach EN 1995-1-1 + NAD	$F_{v,Rd}$ [kN]:	26,09	31,31	18,36	18,36	50,31	27,23
maximaler Tragwiderstand der Kapazitätskurve	$F_{v,R,Versuch,max}$ [kN]:	64,11	61,80	70,00	68,45	129,40	75,50
<b>elastische Reaktion</b>							
Beschleunigung Schnittp. elastisch	$S_{a,el}$ [m/s <sup>2</sup> ]:	8,68	8,68	8,68	8,68	8,68	7,46
Verschiebung Schnittp. elastisch	$S_{d,el}$ [m]:	0,031	0,029	0,032	0,027	0,033	0,041
elastische Reaktionskraft	$R_{el}$ [kN]:	<b>109,52</b>	<b>103,02</b>	<b>117,11</b>	<b>96,94</b>	<b>233,14</b>	<b>143,65</b>
<b>gedämpfte nichtlineare Reaktion</b>							
angenommene viskose Dämpfung	$v_{eq}$ [%]:	10	10	12	9	13	13
Beschleunigung Schnittp. gedämpft nichtlinear	$S_{a,nl+\xi}$ [m/s <sup>2</sup> ]:	4,42	4,24	5,00	6,05	4,79	3,53
Verschiebung Schnittp. gedämpft nichtlinear	$S_{d,nl+\xi}$ [m]:	0,046	0,048	0,036	0,036	0,036	0,048
<b>Verhaltensbeiwert und Überfestigkeitsfaktor bezogen auf den Bemessungswert nach EN 1995-1-1 + NAD, Gleichung (10.11) und (10.12)</b>							
Verhaltensbeiwert	$q$ :	<b>4,20</b>	<b>3,29</b>	<b>5,80</b>	<b>4,80</b>	<b>4,21</b>	<b>5,27</b>
Überfestigkeitsfaktor	$\alpha_u$ :	<b>2,46</b>	<b>1,97</b>	<b>3,47</b>	<b>3,39</b>	<b>2,34</b>	<b>2,77</b>



## 12 Referenz-Untersuchungen an Wandscheiben mit einer Beplankung aus Holzwerkstoffplatten

Um die Ergebnisse der Untersuchung bezüglich ihrer Qualität zu bewerten, wurden Referenz-Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer unter Erdbebenbeanspruchung bewährten Beplankung aus Holzwerkstoffplatten gewählt. Als Plattenwerkstoff wurden Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ nach DIN EN 300 gewählt. Alle weiteren Grundlagen zur Durchführung der Untersuchungen an Wandscheiben wurden ebenso wie die restliche Konstruktion der Wandscheibe nicht verändert. Das durchgeführte Untersuchungsprogramm kann Tabelle A.5 entnommen werden. Es wurden als Standardvariante Wandscheiben mit einer Nenndicke der Platten von 12,0 mm untersucht. Eine Nenndicke der Holzwerkstoffplatte des Typs „OSB“ von 12,0 mm entspricht der in der Anwendung dünnsten Beplankung. Diese hat den geringsten Beul- und Schubwiderstand sowie den geringsten Abscherwiderstand der einschnittigen Verbindung. Ebenso wurde eine Prüfung mit einer Holzwerkstoffplatte des Typs „OSB/4“ der Nenndicke 15,0 mm durchgeführt, da dies die gebräuchlichste Nenndicke bei der Beplankung von Wandscheiben mit diesem Plattentyp ist. Wie bei einigen Wandscheiben mit Beplankung aus Gipsplatten wurden die Verbindungsmittelabstände der Referenz-Untersuchungen von Wandscheiben variiert. Es wurden Verbindungsmittelabstände von 50 mm, 100 mm und 150 mm gewählt. Eine Wandscheibe der Referenz-Untersuchungen mit einer Nenndicke der Platten von 15,0 mm wurde mit dem geringsten Verbindungsmittelabstand (50,0 mm) und Abmessungen der Platte von 2,50 m x 2,50 m durchgeführt, da hier die größten Steifigkeiten zu erwarten waren.

### 12.1 Ergebnisse der Versuche an Wandscheiben mit einer Beplankung aus „OSB“

Grundsätzlich konnten verschiedene Versagensformen festgestellt werden. Diese traten zeitlich versetzt auf. Im Verlauf der Beanspruchung wurde primär ein Versagen der Verbindung des Plattenwerkstoffs mit der Holzunterkonstruktion in den Eckbereichen der Holzrahmenbauwand festgestellt. Sekundär konnte ein randparalleles Versagen der Verbindungen festgestellt werden. Das Versagen der Verbindungen ging von den Ecken aus und nahm zu den Randmitten zu. Ein globales Versagen der Platten konnte nicht festgestellt werden.

Beim Versagen der Verbindung konnte überwiegend ein Ausziehen der Klammern beobachtet werden. Partiiell kam es aufgrund des wiederholten Plastizierens der Klammer zum Bruch einzelner Klammerschäfte. Vereinzelt konnte bei einer Plattendicke von 12,0 mm Kopfdurchzug der Klammern beobachtet werden. Der Tragwiderstand stieg im Verlauf der Beanspruchung auch bei eingetretenem primärem Versagen an. Das Versagen der Wandscheiben in Holzrahmenbauweise wird nachfolgend für jede Prüfung beschrieben.

Tabelle 12.1.1 Eintreten der Versagensmechanismen der zyklischen Untersuchungen an Referenz-Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“.

Versuch-Nr.	Amplitude der zyklischen Beanspruchung bei Eintritt der Versagensmechanismen	
	primär	sekundär
OSB-12,0 H-1-1-1-50	1.Z + 24,0 mm	1.Z + 48,0 mm
OSB-12,0 H-1-1-1-150	1.Z - 36,0 mm	1.Z - 48,0 mm
OSB-12,0 H-1-1-1-100	-	2.Z - 48,0 mm
OSB-15,0 H-1-1-1-50-g	1.Z - 24,0 mm	2.Z - 36,0 mm

**Versuch-Nr. OSB-12,0 H-1-1-1-50**

An dem Probekörper konnte im Verlauf der Prüfung ein Ablösen der Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ von den Randrippen festgestellt werden. Das Versagen der Verbindung begann in den Ecken und setzte sich zu den Mitten der Randrippen fort.

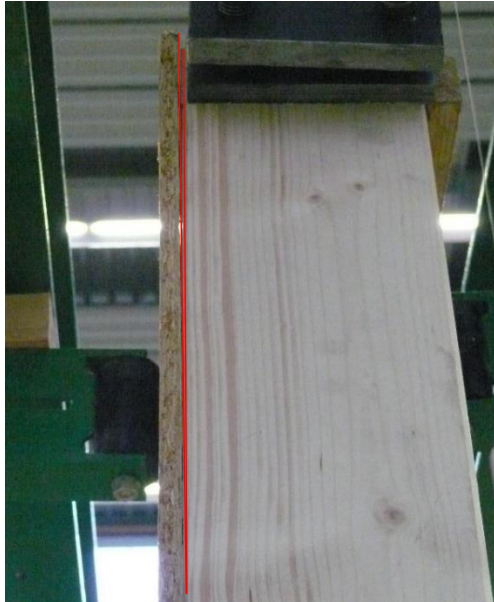


Bild 12.1 Reißverschlussartiges Öffnen der Verbindungen zwischen Beplankung und Unterkonstruktion. Quelle: VHT



Bild 12.2 Verschiebung der Ränder der Holzwerkstoffplatte des Typs „OSB“ an der Stoßrippe. Quelle: VHT

An der Stoßrippe konnten im Verlauf der Beanspruchung Verschiebungen in Richtung des auftretenden Schubflusses festgestellt werden. Mit zunehmender zyklischer Beanspruchung traten von den Wandecken ausgehend ein Herausziehen und nachfolgend ein Bruch der Klammern auf.



Bild 12.3 Beplankung, die sich von der Randrippe löst. Zu sehen sind gebrochene und plastisch verformte Klammern. Quelle: VHT



Bild 12.4 Detailbetrachtung der plastisch verformten und gebrochenen Klammern. Quelle: VHT



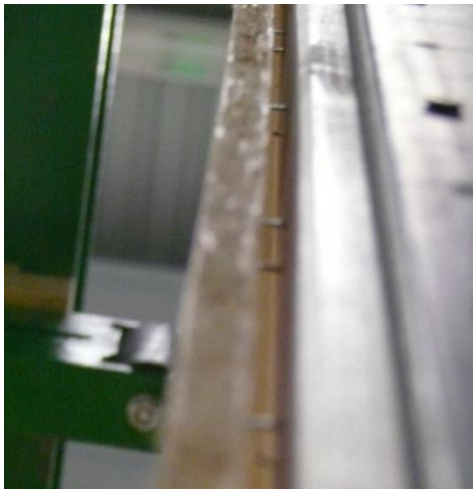
**Versuch-Nr. OSB-12,0 H-1-1-1-150**

Bild 12.5 Die Holzwerkstoffplatte löst sich von der Randrippe. Quelle: VHT



Bild 12.6 Klammern, die durch wiederholtes Plastizieren gebrochen sind. Quelle: VHT

An dem Probekörper wurden die gleichen Versagensmechanismen wie bei OSB-12,0 H-1-1-1-50 beschrieben festgestellt. Der deutlich vergrößerte Abstand der Verbindungen zwischen Beplankung und Randrippe hatte keinen Einfluss auf die Chronologie und Ausprägung der Versagensformen.

**Versuch-Nr. OSB-12,0 H-1-1-1-100**

Auf die Abbildung und Beschreibung der Versagensformen wird verzichtet, da sie den in OSB-12,0 H-1-1-1-50 und OSB-12,0 H-1-1-1-150 geschilderten Abbildungen und Versagensformen entsprechen.

**Versuch-Nr. OSB-15,0 H-1-1-1-50-g**

Bei OSB-15,0 H-1-1-1-50-g wurde als Modifikation die Beplankung variiert. Es wurde eine Beplankung mit einer Nenndicke von 15,0 mm und den Platten-Abmessungen 2,50 m x 2,50 m gewählt. Dabei ist der wesentliche Unterschied die Beplankung der Wand ohne Ausbildung einer mittleren Stoßrippe.



Bild 12.7 Bereich (rote Markierung), in dem ein Herausziehen der Klammern deutlich erkennbar festgestellt werden kann. Quelle: VHT

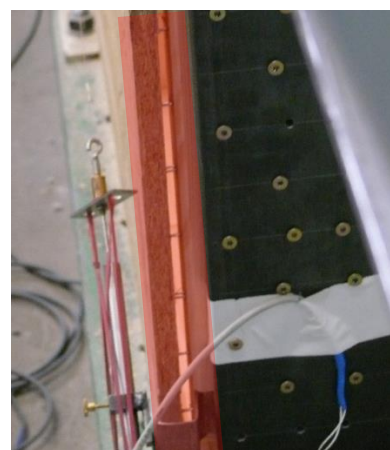


Bild 12.8 Gleichmäßig von der Ecke ausgehend gelöste Holzwerkstoffplatte von den Rippen. Quelle: VHT

Prinzipiell wurden die gleichen Versagensformen wie an den Probekörpern OSB-12,0 H-1-1-1-50, OSB-12,0 H-1-1-1-150 und OSB-12,0 H-1-1-1-100 festgestellt. Wesentlicher Unterschied ist ein deutlich gleichmäßigeres, über die Länge der Randrippen verteiltes Versagen der Verbindungen. Dies deutet auf einen gleichmäßiger verteilten Schubfluss hin. Das von den Ecken ausgehende Lösen der Verbindungen durch Herausziehen der Klammern ist auf einer Länge von ca. 45 cm ausgehend von der Wandecke stark ausgeprägt. Diese Bereiche sind in Bild 12.7 rot markiert.

Um die Qualität der Betrachtung von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ der Nenndicke von 15,0 mm gegenüber Platten gleichen Typs mit einer Nenndicke von 12,0 mm zu verbessern, ist es empfehlenswert, Versuche mit einer Holzwerkstoffplatte des Typs „OSB/4“ der Nenndicke 12,0 mm mit Plattenabmessung 2,50 m x 2,50 m durchzuführen. Alternativ könnten auch Versuche an Wandscheiben mit einer Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ der Nenndicke 15,0 mm und Abmessungen der Platte von 1,25 m x 2,50 m durchgeführt werden.

Im Rahmen der Variation der Referenz-Untersuchungen war es das Ziel, eine Wandscheibe zu untersuchen, die ein möglichst steifes Verhalten aufweist. Dies ist bei kleinem Verbindungsmittelabstand und maximalen Plattenabmessungen, die den Abmessungen der Wand entsprechen, der Fall. In der Praxis werden Wände bis zu 13,0 m Länge mit einer durchgehenden Holzwerkstoffplatte des Typs „OSB“ beplankt.

Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus Holzwerkstoff des Typs „OSB“ haben - wie bereits beschrieben - ein bekannt gutes Verhalten bei einer Beanspruchung durch Erdbeben. Deshalb wird das zyklische Verhalten von Bauteilen mit Beplankung aus gipsgebunden Plattenwerkstoffen mit dem von Bauteilen mit Beplankungen aus Holzwerkstoff des Typs „OSB/4“ verglichen. Dieser Vergleich ist in Abschnitt 13 zu finden.

## 12.2 Modifizierung einer Wandscheibe zur Verbesserung des Verhaltens unter Erdbebenbeanspruchung

Durch die vorhergehenden Untersuchungen an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit verschiedenen Beplankungen wurde festgestellt, dass sich ein primäres Versagen aufgrund der sich ausbildenden Zugdiagonalen einstellt. Dies führt zu einer großen Steifigkeit und infolgedessen zu einem Versagen der Verbindungen im Eckbereich. Aufgrund dieser Beobachtung wurden am Probekörper zum Versuch-Nr. OSB-12,0 H-1-1-1-50-k die Ecken durch einen Trennschnitt gekappt. Die Ausbildung von Zugdiagonalen ist so nicht mehr möglich. Dies kann auch durch das Weglassen der Befestigung der Beplankung im Eckbereich erzielt werden – so können sich weder Druck- noch Zugdiagonalen ausbilden. Durch den verklammerten Eckbereich wurde jedoch auch eine weiterhin intakte Verbindung zwischen Randrippen und Kopf- /Fußrippen geschaffen. Auch der Einfluss der Geometrie kann so sehr gut sichtbar gemacht werden, da sich die Ecken nur auf Druck mit verformen und bei einer Zugbeanspruchung die Größe der sonst durch die Ecken aufzunehmenden Verschiebung gut sichtbar wird. Aus den Versuchen sollte der Einfluss auf die duktilen Eigenschaften untersucht werden. Nachfolgend sind die Randbedingungen zur Geometrie der Wandscheibe zusammengefasst.

Tabelle 12.2.1 Referenz - Untersuchungen an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ und Trennschnitten in den Zugdiagonalen.

Versuch-Nr.	Anzahl	Werkstoff / Beplankung	Verbindungsmittel	Verbindungsmittel- abstand	Belastung
OSB-12,0 H-1-1-1-50-k	1	OSB/4 12,0 mm, 1,25 m x 2,50 m einseitig; Ecken gekappt	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch

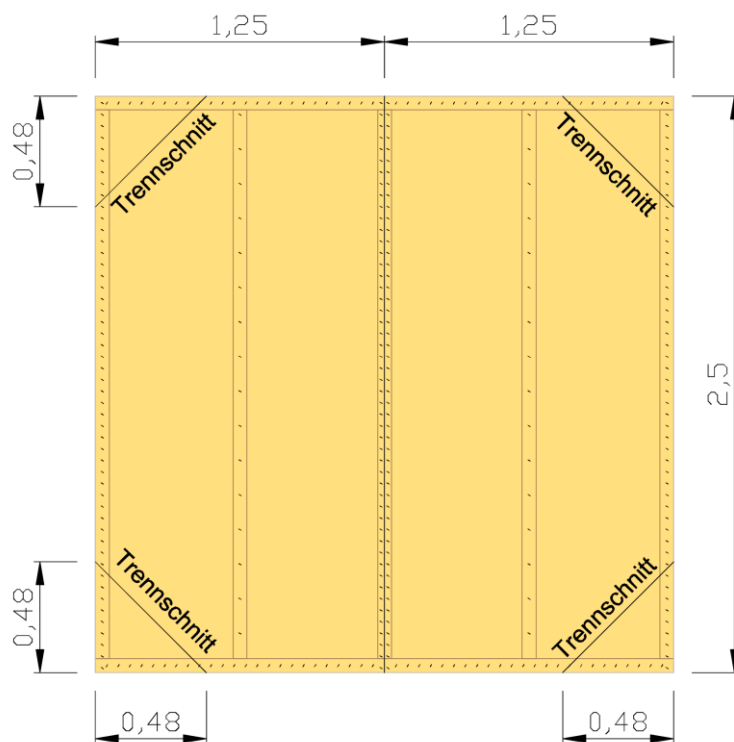


Bild 12.9 Abmessungen des Versuchs OSB-12,0 H-1-1-1-50-k. Der Winkel zwischen Klammerrücken und Faserrichtung beträgt 60°. Es wurden zwei Platten je 1,25 m x 2,50 m als Beplankung verwendet. In den Ecken der Wand wurden Trennschnitte angeordnet. Alle Maße in Meter.

Die Ergebnisse des Referenz-Versuchs sind geprägt von einem deutlich homogeneren Verhalten der Wandscheibe. Der primäre Versagensmechanismus konnte nicht festgestellt werden. An dem Probekörper konnte im Verlauf der Prüfung ein Öffnen und Schließen der Trennschnitte beobachtet werden. Dabei wurden die gekappten Ecken bei Beanspruchung auf Druck über den Plattenrand hinaus plastisch verschoben.

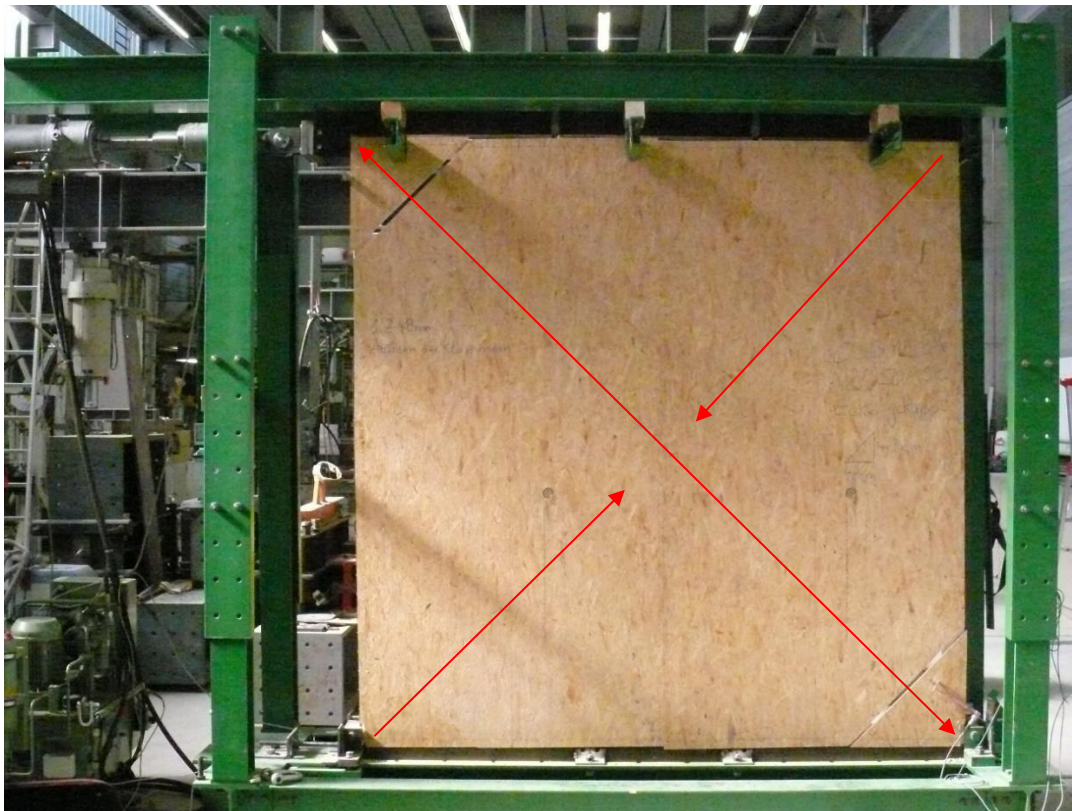


Bild 12.10 Wandscheibe in Holzrahmenbauweise mit gekappten Ecken. Die Zugdiagonale (von links oben nach rechts unten) ist entlastet. Die Druckdiagonale (von rechts oben nach links unten) ist wirksam.



Bild 12.11 Detail aus Bild 12.10 mit gedrückter Fuge der Druckdiagonale.

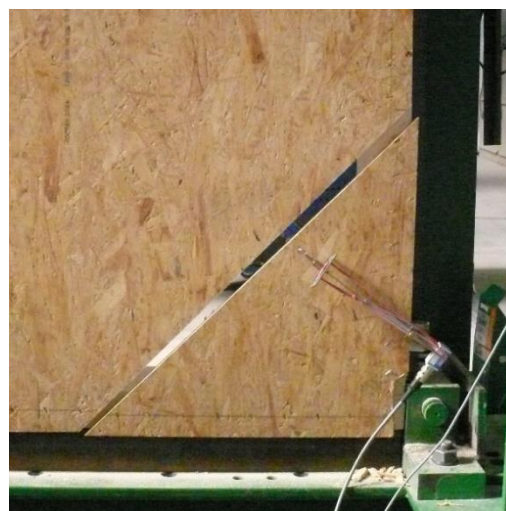


Bild 12.12 Detail aus Bild 12.10 mit offener Fuge der Zugdiagonale.



Ein Ablösen der Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ von den Randrippen wurde festgestellt. Das Versagen der Verbindung im Schubwirksamen Beplankungsbereich fand gleichmäßig verteilt statt. An den Verbindungen konnte auch hier ein Herausziehen und Bruch der Klammern festgestellt werden.



Bild 12.13 Durch Druck über den Rippenrand hinaus geschobene gekappte Ecken.



Bild 12.14 Ablösen der Holzwerkstoffplatte im Bereich der Schubwirksamen Beplankung. Die gekappte Ecke wird nur in Druckrichtung verschoben und löst sich nicht von den Rippen.

Nachfolgend wird das Eintreten der Versagensmechanismen festgehalten.

Tabelle 12.2.2 Eintreten der Versagensmechanismen der zyklischen Untersuchungen an einer Referenz-Wand-scheibe in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ und Trennschnitten in den Zugdiagonalen.

Versuch-Nr.	Amplitude der zyklischen Beanspruchung bei Eintritt der Versagensmechanismen	
	primär	sekundär
OSB-12,0 H-1-1-1-50-k	Ecken gekappt	1.Z + 48,0 mm

Zum Vergleich der Wandscheibe mit Trennschnitten in den Zugdiagonalen mit der Wandscheibe ohne Trennschnitten in den Zugdiagonalen werden im ersten Schritt beide Verläufe der Hysterese in einem Diagramm abgebildet.

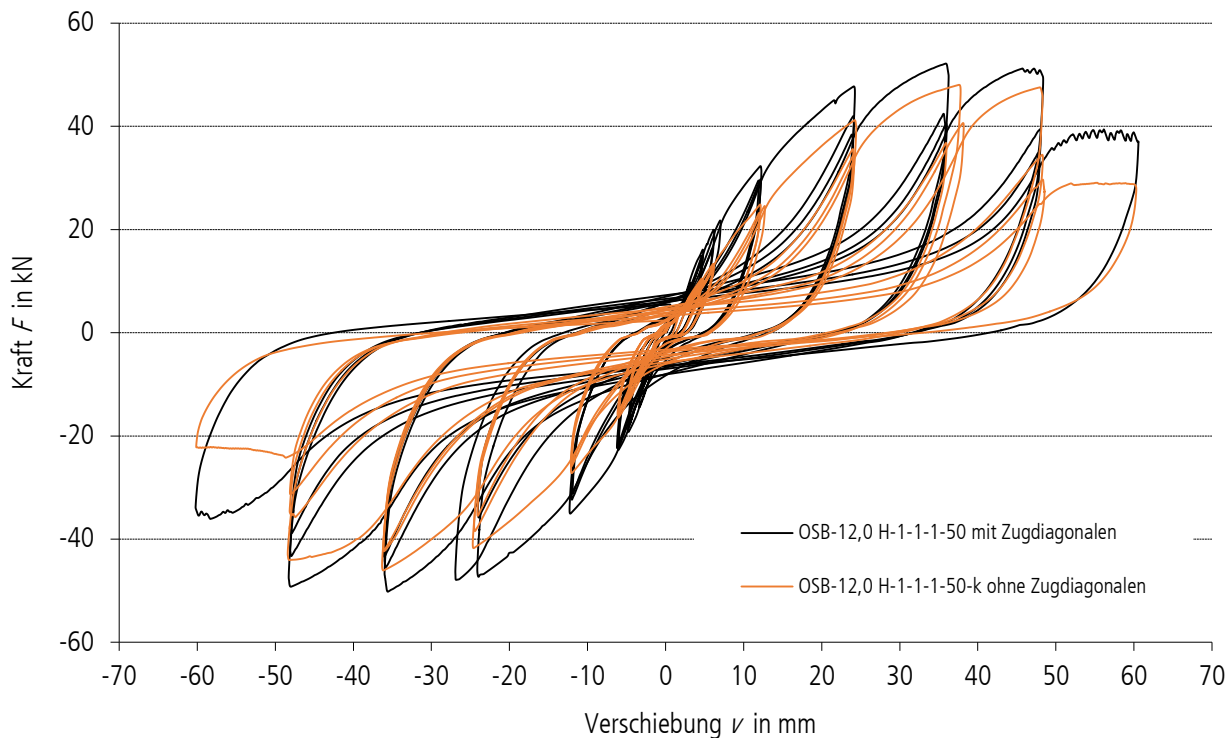


Bild 12.15 Gegenüberstellung der Verläufe der Hysterese einer Wandscheibe in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ mit intakten Zugdiagonalen und einer Wandscheibe in Holzrahmenbauweise mit gleicher Beplankung ohne intakte Zugdiagonalen.

Anhand der Hysteresen ist erkennbar, dass das Durchtrennen der Zugdiagonalen zu einer signifikanten Reduzierung der Steifigkeit führt. Zu Beginn der Hysterese nimmt diese einen deutlich flacheren Verlauf an und erreicht im Bereich der maximalen Last nahezu das Niveau der Wandscheibe ohne durchtrennte Zugdiagonalen.

Um im zweiten Schritt die Unterschiede im Verhalten deutlicher zu zeigen, werden an den Hysteresen die einhüllenden Kurven für die Erstbelastung und Wiederbelastung bestimmt. Die Wiederbelastung wird zwischen 1. und 2. Wiederbelastung unterschieden. Es zeigt sich bei näherer Betrachtung, dass die Lasten der einhüllenden Kurven der 2. Wiederbelastung von Wandscheiben mit intakten Zugdiagonalen ein geringeres Verhältnis zur erreichten Last bei Erstbelastung und gleicher Verschiebung erreichen.

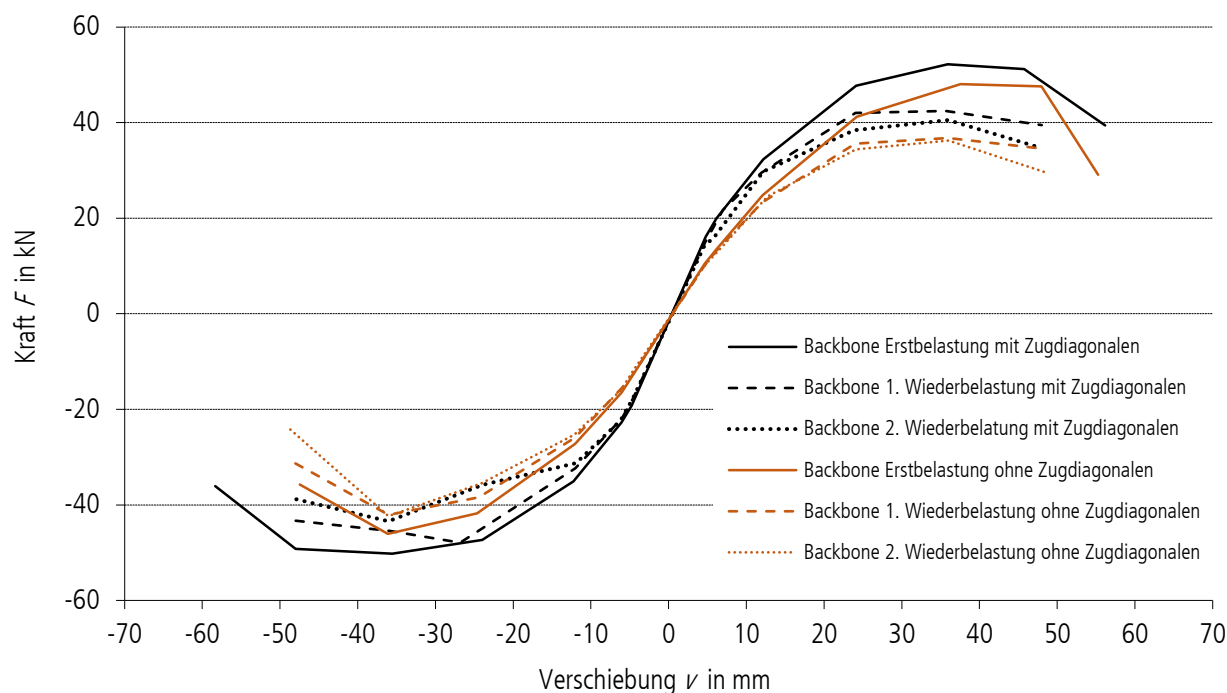


Bild 12.16 Einhüllende Kurven („Backbone“ – Kurven) der Erst- und Wiederbelastung zweier gleicher Versuche mit dem Unterschied einer intakten Zugdiagonale und einer durchtrennten Zugdiagonale.

Aufgrund der steiferen Konstruktion der Wandscheibe mit intakter Zugdiagonale wird das Versagensniveau einer Wandscheibe mit intakter Zugdiagonale bei geringeren Verschiebungen erreicht. Als Grenzkriterium wird ein Kraftabfall zwischen Erstbelastung und 2. Wiederbelastung größer gleich 20 % bei gleicher Amplitude definiert.

Tabelle 12.2.3 Kraftabfall zwischen Erstbelastung und 2. Wiederbelastung von zwei gleichen Wandscheibenversuchen mit dem Unterschied intakter Zugdiagonalen (mit Zugdiagonalen) und durchtrennter Zugdiagonalen (ohne Zugdiagonalen). Der Kraftabfall bei Erreichen des Grenzkriteriums ist unterstrichen.

Amplitude	Kraftabfall			
	mit Zugdiagonalen		ohne Zugdiagonalen	
	Druck-Halbzyklus	Zug-Halbzyklus	Druck-Halbzyklus	Zug-Halbzyklus
± 4,5 mm	12,4 %	7,3 %	2,3 %	8,7 %
± 6,0 mm	18,6 %	1,7 %	5,4 %	3,2 %
± 12,0 mm	7,9 %	10,9 %	1,1 %	7,0 %
± 24,0 mm	19,5 %	<u>24,3 %</u>	16,5 %	15,0 %
± 36,0 mm	22,3 %	37,6 %	<u>24,6 %</u>	8,1 %
± 48,0 mm	22,3 %	31,1 %	37,6 %	32,2 %

Es ist zu erwarten, dass sich bei Wandscheiben mit einer Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen ein ähnliches Verhalten einstellt. Weitere Untersuchungen mit gipsgebundenen Plattenwerkstoffen wären hierzu wünschenswert. Um den geringeren Tragwiderstand zu kompensieren, wäre auch die Verringerung des Abstands der Verbindungsmittel bei Wandscheiben mit durchtrennter Zugdiagonale im nicht abgetrennten Rand denkbar.

### 12.3 Betrachtung der Ankerkräfte infolge einer zyklischen Beanspruchung

Durch die mit dem Verlauf der zyklischen Beanspruchung zunehmende Schädigung der einzelnen Verbindungen der Wandscheibe in Holzrahmenbauweise wäre es möglich, dass sich die geometrischen Randbedingungen zur Bestimmung der Verankerungskräfte verändern. Dies könnte zur Folge haben, dass Ankerkräfte aufgrund einer Verschiebung des Drehpunktes verbunden mit einer Reduzierung des anzunehmenden Hebelarms signifikant zunehmen. Um festzustellen, welches Verhalten sich tatsächlich einstellt und ob dies im Rahmen einer Beurteilung von z.B. Überfestigkeiten zu berücksichtigen ist, wurden nachfolgend beschriebene Untersuchungen durchgeführt. Die Wahl des Beplankungswerkstoffs „OSB/4“ wird im Rahmen dieser Untersuchung als nicht relevant betrachtet, da die Stellen des Versagens der Verbindungen örtlich in gleicher Reihenfolge wie an Wänden in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen vorzufinden waren. Um diese Schlussfolgerung zu belegen, wäre es empfehlenswert, gleiche Versuche an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen durchzuführen.

Bei den Versuchen-Nr. OSB-12,0 H-1-1-1-150, OSB-12,0 H-1-1-1-100 und OSB-15,0 H-1-1-1-50-g mit unterschiedlichen Abständen der Verbindungen an den Plattenrändern wurde zusätzlich die Kraft an einer Verankerungsseite mittels auf der Stahlflasche angebrachten Dehnmessstreifen gemessen.



Bild 12.17 Dehnmessstreifen auf der Innenseite der Stahlflasche.

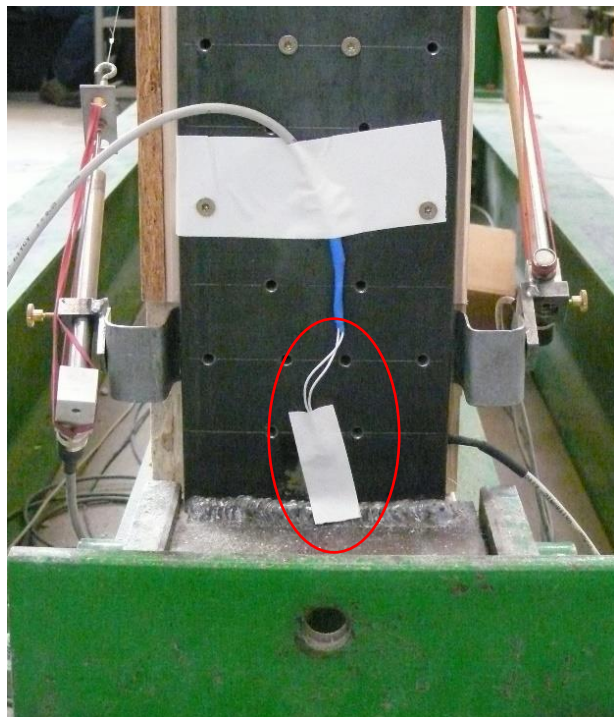


Bild 12.18 Dehnmessstreifen auf der Außenseite der Stahlflasche.

Die auftretenden Ankerkräfte wurden an drei Wandscheiben in Holzrahmenbauweise gemessen. Es wurden sowohl Druck- als auch Zugkräfte gemessen. Zur Beurteilung der auftretenden Ankerkräfte wurden die Hysteresen der Horizontalkraft den Hysteresen der Ankerkraft gegenüber gestellt.

Bei Verschiebungen in positiver Richtung entstehen Druckkräfte an dem Anker. Entgegengesetzt entstehen bei Verschiebungen in negativer Richtung Zugkräfte an dem Anker. Ankerkräfte und Horizontalkräfte einer idealen Scheibe mit quadratischer Abmessung wären gleich groß.



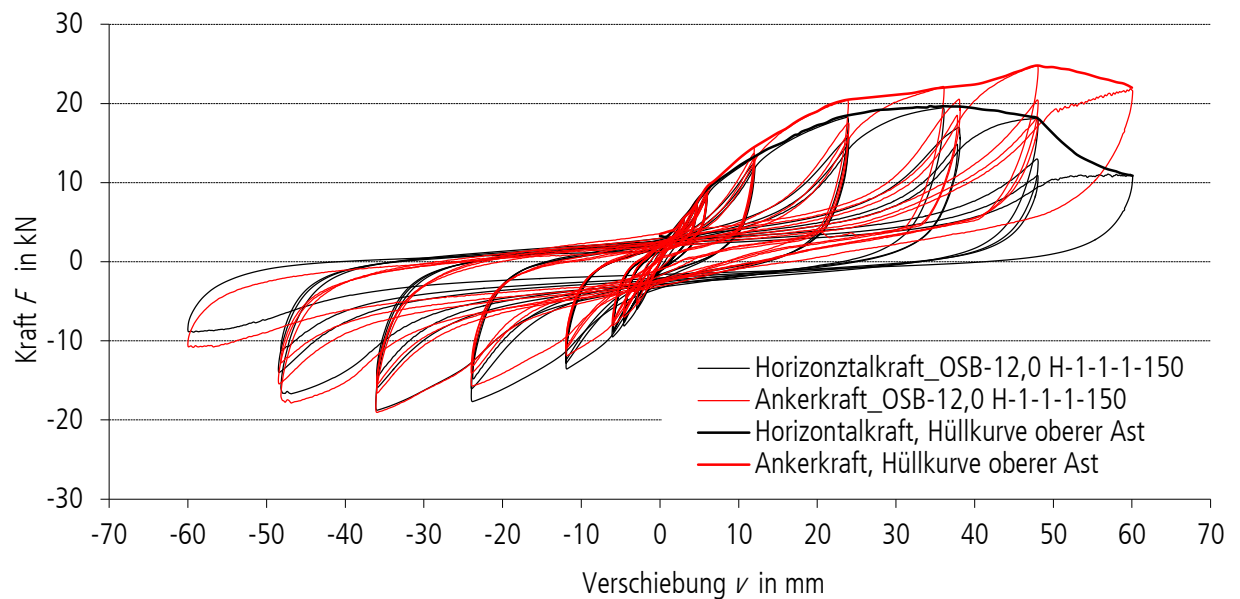
**Versuch-Nr. OSB-12,0 H-1-1-1-150**

Bild 12.19 Verlauf der Hysterese des Versuchs mit einer Wandscheibe in Holzrahmenbauweise mit einseitiger Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ der Nenndicke 12,0 mm. Der Klammerabstand beträgt 150 mm an den Randrippen und 150 mm an den Innenrippen. Die Hysterese werden im Druckbereich durch die Hüllkurven eingeschlossen. Es werden die Hysterese der Horizontalkraft und der Ankerkraft des Versuchs abgebildet.

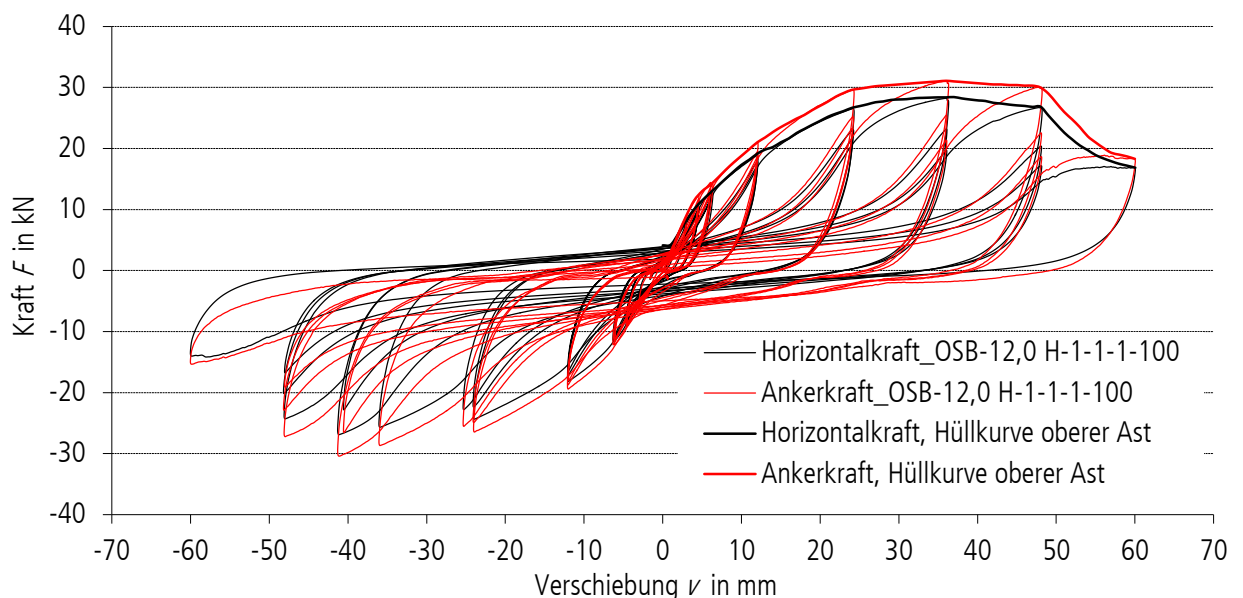
**Versuch-Nr. OSB-12,0 H-1-1-1-100**

Bild 12.20 Verlauf der Hysterese des Versuchs mit einer Wandscheibe in Holzrahmenbauweise mit einseitiger Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ der Nenndicke 12,0 mm. Der Klammerabstand beträgt 100 mm an den Randrippen und 150 mm an den Innenrippen. Die Hysterese werden im Druckbereich durch die Hüllkurven eingeschlossen. Es werden die Hysterese der Horizontalkraft und der Ankerkraft des Versuchs abgebildet.

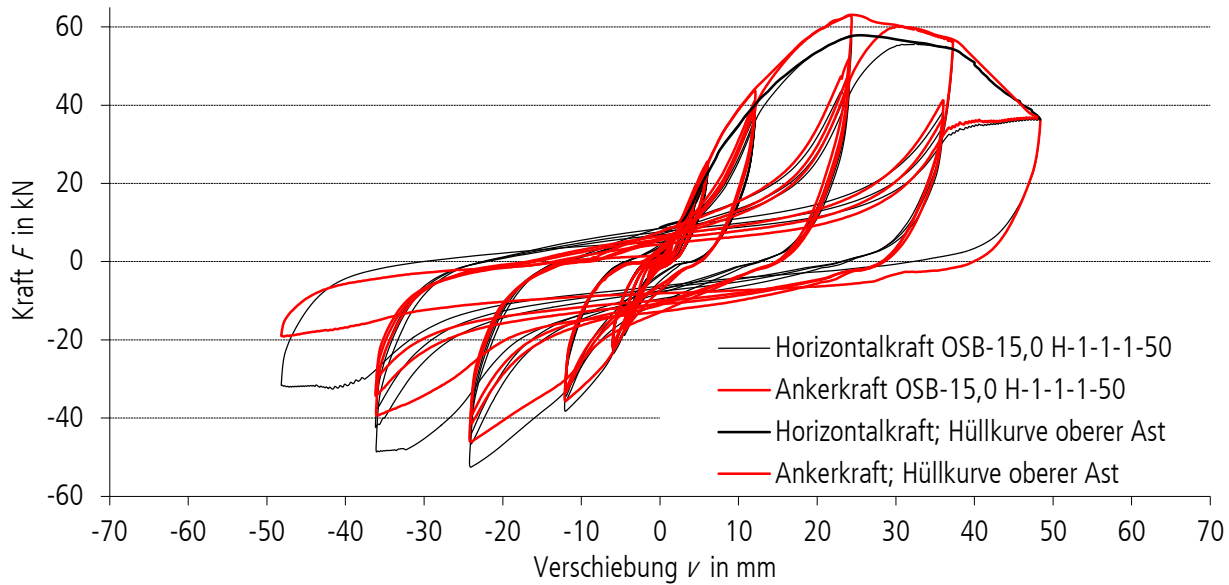
**Versuch-Nr. OSB-15,0 H-1-1-1-50-g**

Bild 12.21 Verlauf der Hysterese des Versuchs mit einer Wandscheibe in Holzrahmenbauweise mit einseitiger Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB“ der Nenndicke 15,0 mm. Der Klammerabstand beträgt 50 mm an den Randrippen und 150 mm an den Innenrippen. Die Abmessung der Platte beträgt 2,50 m x 2,50 m. Die Hysterese wird im Druckbereich durch die Hüllkurven eingeschlossen. Es werden die Hysterese der Horizontalkraft und der Ankerkraft des Versuchs abgebildet.

Ein signifikanter Unterschied zwischen Ankerkräften und Horizontalkräften ist zu Beginn der zyklischen Beanspruchung nicht feststellbar. Nach dem Erreichen der maximalen Kraft werden die Abweichungen zwischen Horizontalkraft und Ankerkraft deutlich größer. Dies setzt sich fort und die Differenz zwischen Horizontalkraft und Ankerkraft nimmt zu.

Die sich ergebenden Differenzen zwischen Anker und Horizontalkraft werden als vernachlässigbar betrachtet. Eine Berücksichtigung von Effekten, die zu einer Vergrößerung notwendiger Verankerungskräfte führen, wird bei der Bestimmung von Überfestigkeitsfaktoren als nicht notwendig betrachtet. Die gemessenen maximalen Ankerkräfte liegen nur geringfügig über den für die Verankerungen maßgebenden maximalen Horizontalkräften. Die Ergebnisse werden auch auf die hier betrachteten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen übertragen.

## 12.4 Bewertung der duktilen Eigenschaften nach dem Prinzip gleicher Formänderungsarbeit und auf Grundlage der Kapazitätsspektrum-Methode

Um die Untersuchungen an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen mit den Versuchen an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Referenzbeplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ zu vergleichen, werden diese nach der gleichen Vorgehensweise beurteilt. Für Referenz-Wandscheiben mit einer Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ wird nach DIN EN 1995-1-1 + NA ein charakteristischer Wert der Tragfähigkeit  $F_{v,Rk}$  bestimmt. Bei der Bestimmung der Abscherwiderstände der Verbindung wurde auf die Erhöhung der Tragfähigkeit aufgrund des Einhängeeffekts mit  $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$  und gemäß DIN EN 1995-1-1, 9.2.4.2(5) um 20 % verzichtet. Die Werte aufgrund der beiden angewendeten Bewertungsmethoden können Tabelle 12.4.1 und Tabelle 12.4.2 entnommen werden.

Tabelle 12.4.1 Charakteristische Werte der Tragfähigkeit, Verhaltensbeiwerte, Verschiebeduktilitäten und Überfestigkeitsfaktoren der untersuchten Referenz-Wandscheiben in Holzrahmenbauweise. Die Werte wurden nach dem Prinzip gleicher Formänderungsarbeit bestimmt.

		Versuch-Nr.				
		OSB-12,0 H-1-1-1-50	OSB-12,0 H-1-1-1-50-k	OSB-12,0 H-1-1-1-150	OSB-12,0 H-1-1-1-100	OSB-15,0 H-1-1-1-50-g
Charakteristischer Wert der Tragfähigkeit	$F_{v,Rk}$ [kN]	31,45	18,87	10,48	15,73	34,71
Verhaltensbeiwert	$q$	3,08	3,26	3,19	3,28	2,77
Überfestigkeitsfaktor	$\alpha_u$	1,49	2,34	1,70	1,64	1,51
Verschiebeduktilität	$\mu$	5,23	5,81	6,35	6,42	4,34

Tabelle 12.4.2 Ermittlung der Verhaltensbeiwerte und Überfestigkeitsfaktoren der Referenz-Wandscheiben in Holzrahmenbauweise. Die Werte wurden nach der Kapazitätsspektrum-Methode bestimmt.

		Versuch-Nr.				
		OSB-12,0 H-1-1-1-50	OSB-12,0 H-1-1-1-50-k	OSB-12,0 H-1-1-1-150	OSB-12,0 H-1-1-1-100	OSB-15,0 H-1-1-1-50-g
<b>Eingangswerte</b>						
elastische Steifigkeit	$K_{el}$ [N/mm]:	3.000	2.000	1.100	1.750	3.500
Bemessungswert der Tragfähigkeit nach EN 1995-1-1 + NAD	$F_{v,Rd}$ [kN]:	34,60	20,76	11,53	17,28	38,18
maximaler Tragwiderstand der Kapazitätskurve	$F_{v,R, Versuch, max}$ [kN]:	51,39	48,67	19,66	28,43	57,84
<b>elastische Reaktion</b>						
Beschleunigung Schnittp. elastisch	$S_{a,el}$ [m/s <sup>2</sup> ]:	8,68	7,61	8,32	8,68	8,68
Verschiebung Schnittp. elastisch	$S_{d,el}$ [m]:	0,034	0,040	0,037	0,033	0,023
elastische Reaktionskraft	$R_{el}$ [kN]:	<b>101,93</b>	<b>80,47</b>	<b>40,36</b>	<b>58,57</b>	<b>81,33</b>
<b>gedämpfte nichtlineare Reaktion</b>						
angenommene viskose Dämpfung	$v_{eq}$ [%]:	10	9	12	11	9
Beschleunigung Schnittp. gedämpft nichtlinear	$S_{a, nl+\xi}$ [m/s <sup>2</sup> ]:	4,32	4,53	3,76	3,98	5,72
Verschiebung Schnittp. gedämpft nichtlinear	$S_{d, nl+\xi}$ [m]:	0,047	0,048	0,048	0,048	0,038
<b>Verhaltensbeiwert und Überfestigkeitsfaktor bezogen auf den Bemessungswert nach EN 1995-1-1 + NAD, Gleichung (10.11) und (10.12)</b>						
<b>Verhaltensbeiwert</b>	$q$ :	<b>2,94</b>	<b>3,87</b>	<b>3,50</b>	<b>3,39</b>	<b>2,13</b>
<b>Überfestigkeitsfaktor</b>	$\alpha_u$ :	<b>1,49</b>	<b>2,34</b>	<b>1,70</b>	<b>1,64</b>	<b>1,51</b>

### 13 Gegenüberstellung der Eigenschaften unter Erdbeben von gipsgebundenen Platten und „OSB/4“-Platten

Unabhängig von den Ergebnissen der Untersuchungen nach dem Prinzip der gleichen Formänderungsarbeit und der Kapazitätsspektrum-Methode sollen die Ergebnisse von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen und Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ miteinander verglichen werden. Dies soll die grundsätzliche Eignung von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen im Vergleich zu einem hinreichend bekannten Beplankungsmaterial mit guten Eigenschaften unter Erdbebenbeanspruchung, wie sie bei Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ zu finden sind, einordnen. Als gute Eigenschaft wird hier das hochduktile Verhalten von Wänden in Holzrahmenbauweise mit geklammerter Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ bezeichnet.

Wesentliches Merkmal ist dabei die Duktilität. Nach DIN 4149 und DIN EN 1998-1 gibt es für den Holzbau drei Duktilitätsklassen. DIN 4149 kennt die Duktilitätsklassen „1“, „2“ und „3“. Die Duktilität nimmt dabei mit aufsteigender Klasse zu. DIN EN 1998-1 kennt die Duktilitätsklassen „DCL“, „DCM“ und „DCH“, wobei „L“ für Low, „M“ für Medium und „H“ für High steht und dies sich auf das dissipative Vermögen bezieht. Die in den Referenz-Untersuchungen betrachteten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ und Klammern als Verbindungsmittel werden in der jeweils höchsten Duktilitätsklasse eingruppiert. Nachfolgend werden dazu die Ergebnisse der hier durchgeführten Untersuchungen an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise miteinander verglichen. Es erfolgt ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse nach dem Prinzip der gleichen Formänderungsarbeit und nach der Kapazitätsspektrum-Methode.

Tabelle 13.1.1 Zusammenstellung der Verhaltensbeiwerte, Verschiebeduktilitäten und Überfestigkeitsfaktoren der untersuchten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Holzwerkstoffplatten und mit Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen. Die Werte wurden nach dem Prinzip gleicher Formänderungsarbeit bestimmt.

		Versuch-Nr. / Plattentyp			
		OSB-12,0 H-1-1-1-50 H-1-1-1-100 H-1-1-1-150	Gipsplatten Typ DF	Gipsplatten Typ DFH2IR Typ DEFH1IR	Gipsfaserplatten Typ GF-W2 Typ GF-C1-I-W2 Typ GF-I-W2-C1
Verhaltensbeiwert	$q$	3,08 – 3,28	2,17 – 2,45	2,93 – 5,14	3,21 – 4,44
Überfestigkeitsfaktor	$\alpha_u$	1,49 – 1,70	1,18 – 1,34	1,66 – 4,15	1,97 – 3,39
Verschiebeduktilität	$\mu$	5,23 – 6,42	2,88 – 3,52	4,83 – 13,71	5,92 – 10,34

Der Vergleich von Wandscheiben mit einer Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen und Wandscheiben mit einer Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ teilt die gipsgebundenen Plattenwerkstoffe deutlich in drei Gruppen. Es entsteht die Gruppe der Platten vom Typ „DF“. Diese Gruppe hat ein erkennbar geringeres duktileres Verhalten als Wandscheiben mit einer Beplankung aus „OSB/4“. Ein vergleichbares Verhalten mit ähnlich duktilen Eigenschaften wie Wandscheiben mit einer Beplankung aus „OSB/4“ weisen Wandscheiben mit einer Beplankung aus Gipsfaserplatten auf. Sowohl bei Wandscheiben mit einer Beplankung aus „OSB/4“ als auch bei Wandscheiben mit

einer Beplankung aus Gipsfaserplatten bilden sich am Verbindungsmittel zwei Fließgelenke aus. Dies führt zu einem ähnlich duktilen Verhalten.

Wandscheiben mit einer Beplankung aus Gipsplatten mit erhöhter Festigkeit (Typen DFH2IR und DEFH1IR) haben geringere duktile Eigenschaften als Wandscheiben mit einer Beplankung aus „OSB/4“. Die große Bandbreite der Werte für Gipsplatten dieser Typen entsteht durch die Bewertung in Bezug auf das Bemessungsmodell nach DIN EN 1995-1-1 + NA. Dieses wurde in 2013 letztmalig geändert und führt zu geringeren rechnerischen Tragfähigkeiten; infolge dessen zu größeren rechnerischen duktilen Eigenschaften (weitere Ausführungen in Abschnitt 10.4).

Nachfolgend werden nun die Ergebnisse aus der Untersuchung mit Anwendung der Kapazitätsspektrum-Methode betrachtet.

Tabelle 13.1.2 Zusammenstellung der Verhaltensbeiwerte und Überfestigkeitsfaktoren der untersuchten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ und mit einer Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen. Die Werte wurden nach der Kapazitätsspektrum-Methode bestimmt.

	Versuch-Nr. / Plattentyp			
	OSB-12,0 H-1-1-1-50 H-1-1-1-100 H-1-1-1-150	Gipsplatten Typ DF	Gipsplatten Typ DFH2IR Typ DEFH1IR	Gipsfaserplatten Typ GF-W2 Typ GF-C1-I-W2 Typ GF-I-W2-C1
angenommene viskose Dämpfung $v_{eq}$ [%]	10 - 12	12 - 14	12 - 14	9 - 13
Verhaltensbeiwert $q$	2,94 – 3,50	2,00 – 2,22	2,88 – 5,42	3,29 – 5,80
Überfestigkeitsfaktor $\alpha_u$	1,49 – 1,70	1,18 – 1,34	1,66 – 4,15	1,97 – 3,47

Die Streuung der Ergebnisse zum duktilen Verhalten - bestimmt nach der Kapazitätsspektrum-Methode - nimmt bei Beplankung mit „OSB/4“, Gipsplatten mit erhöhter Festigkeit „R“ und Gipsfaserplatten zu. Dies ist auch durch die Berücksichtigung der unterschiedlichen Werte der Dämpfung begründet. Diese weisen ebenfalls eine gewisse Streuung auf. Grundsätzlich führt ein Vergleich zu ähnlichen Schlussfolgerungen wie bei der Bewertung nach dem Prinzip gleicher Formänderungsarbeit. Neben dem Verhaltensbeiwert und der Überfestigkeit sind auch die Werte der Dämpfung angegeben. Diese haben für alle untersuchten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise eine ähnliche Größe. [29] nimmt die Dämpfung von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer geklammerten Beplankung aus Flachpressplatten (Spanplatten) mit 10 % an. Diese Erkenntnis kann auch aus den hier untersuchten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen gewonnen werden. Wände mit Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen besitzen somit ein vergleichbares Dämpfungsvermögen wie Wände mit Beplankung aus „OSB/4“. Im nichtlinearen Verhalten sind auch hier die Gipsfaserplatten dem Plattenwerkstoff „OSB/4“ am ähnlichsten. Dies zeigen auch die in den Abschnitten 9.2 und 12.1 dokumentierten Versagensformen. Bei Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ und Gipsfaserplatten kommt es zu vergleichbaren Versagensformen.

Für Gipsplatten mit erhöhter Festigkeit der Typen „DFH2IR“ und „DEFH1IR“ ist ein Vergleich des Verhaltensbeiwerts und der Überfestigkeit kritisch zu betrachten, da das Bemessungskonzept wie zuvor geschildert das Versagen nicht hinreichend abbildet. Anhand der auftretenden Versagensformen ist das duktile Verhalten dieser Gipsplatten von geringerer Duktilität als das duktile Verhalten von „OSB/4“.

Neben dem direkten Vergleich wurde auch eine Wandscheibe in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus „OSB/4“ mit der doppelten Plattenbreite (2,50 m) eines üblichen Versuchs bewertet. Dabei ist festzustellen, dass die duktilen Eigenschaften mit zunehmender Plattenbreite der Beplankung abnehmen. An dieser mit „OSB/4“ beplankten Wandscheibe konnte ein Wert der Dämpfung von 9 % festgestellt werden. Das ist der geringste Wert innerhalb der zum Vergleich betrachteten und mit „OSB/4“ beplankten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise. Der Verhaltensbeiwert wird nach den beiden Bewertungsmethoden mit 2,77 und 2,13 angegeben. Diese Verhaltensbeiwerte liegen dann im Bereich einer Wandscheibe in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DF“ mit einer Plattenbreite von 1,25 m. Diese Feststellung legt nahe, dass unter Umständen die Breite der Beplankung einen größeren Einfluss auf die Duktilität hat als die Art der Beplankung, sofern es sich um gipsgebundenen Platten und Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ handelt.





## 14 Empfehlungen

### 14.1 Empfehlung von Verhaltensbeiwerten und Überfestigkeitsfaktoren

Für Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen werden aufgrund der Ergebnisse dieser Untersuchung einheitliche Werte für den Verhaltensbeiwert und den Überfestigkeitsfaktor für Gipsplatten nach DIN EN 520 und einheitliche Werte für Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2 vorgeschlagen.

Tabelle 14.1.1 Empfehlungen zum Verhaltensbeiwert und zu Überfestigkeitsfaktoren von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen nach DIN EN 520.

Versuch-Nr.	Verhaltensbeiwert $\eta$	Überfestigkeitsfaktor $\alpha_u$
<b>Prinzip der gleichen Formänderungsarbeit, Scherkörper</b>		
DF-12,5 H-3-2-1	2,31	1,32
DF-18,0 H-3-2-1	2,17	2,85
DFH2IR-12,5 H-3-2-1	2,43	3,75
DFH2IR-15,0 H-3-2-1	2,25	3,04
DEFH1IR-12,5 H-3-2-1	2,21	1,46
<b>Prinzip der gleichen Formänderungsarbeit, Wandscheiben</b>		
DF-12,5 H-1-2-1	2,17	1,27
DF-12,5 H-1-2-2	2,45	1,34
DF-18,0 H-1-2-2	2,29	1,18
DFH2IR-12,5 H-1-2-2	2,93	1,66
DFH2IR-12,5 H-1-1-2	4,66	2,72
DEFH1IR-12,5 H-1-1-1	5,14	4,15
<b>Kapazitätsspektrum-Methode</b>		
DF-12,5 H-1-2-1	2,00	1,27
DF-12,5 H-1-2-2	2,22	1,32
DF-18,0 H-1-2-2	2,04	1,18
DFH2IR-12,5 H-1-2-2	2,88	1,66
DFH2IR-12,5 H-1-1-2	4,92	2,72
DEFH1IR-12,5 H-1-1-1	5,42	4,15
<b>Empfehlung für die untersuchten Typen von Gipsplatten nach DIN EN 520</b>	<b><math>\leq 2,0</math></b>	<b><math>\geq 1,5</math></b>

Für die Bemessung von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise nach DIN EN 1995-1-1 + NA und EN 1998-1-1(bzw. DIN 4149) mit einer Beplankung aus Gipsplatten der Typen „DF“, „DFH2IR“ und DEFH1IR“ nach DIN EN 520 wird

ein Verhaltensbeiwert von  $q \leq 2,0$  und ein Überfestigkeitsfaktor  $\alpha_u \geq 1,5$  empfohlen. Dabei ist zu beachten, dass besonders der Überfestigkeitsfaktor starken Schwankungen unterliegt. Dies ist größtenteils auf das Bemessungskonzept nach DIN EN 1995-1-1/NA zurückzuführen. Hier wurde im Jahr 2013 der Passus eingefügt, dass mit dem geringsten Wert aus Schub- und Zugfestigkeit der Nachweis der Schubfestigkeit zu erbringen ist. Für Gipsplatten nach DIN EN 520 ist dies die Zugfestigkeit senkrecht zur Herstellrichtung (siehe Tabelle 10.1.1). Dadurch wird die Tragfähigkeit stark herabgesetzt. Dies führt besonders bei dem Plattentyp „R“ mit erhöhter Festigkeit zu starken Abweichungen zwischen Versuchsergebnis und rechnerischer Tragfähigkeit. Untersuchungen von Rädels, Wetzel und Abel (siehe Abschnitt 16.3) haben gezeigt, dass dies das tatsächliche Bruchverhalten nicht abbildet. Es konnte in den Untersuchungen ein Versagen unter Haupt-Zugspannungsrichtung festgestellt werden. Diese stellte sich bei Plattenversagen einer Wandscheibe unter einer Orientierung von  $45^\circ$  zur Herstellrichtung ein. Unter dieser Orientierung konnten deutlich höhere Zugfestigkeiten des untersuchten Plattenwerkstoffs festgestellt werden. Eine Überprüfung des Bemessungskonzepts nach DIN EN 1995-1-1/NA für Gipsplatten nach DIN EN 520 wäre wünschenswert (siehe auch Abschnitt 9.2).

An dieser Stelle erfolgt auch der Hinweis, dass die Wahl des Bemessungskonzepts und Änderungen am Bemessungskonzept direkten Einfluss auf die Größe der Verhaltensbeiwerte und Überfestigkeitsfaktoren haben. Wird das Bemessungskonzept geändert, folgt aufgrund der Bewertung mit den angewendeten Methoden auf einen größeren Verhaltensbeiwert auch ein größerer Überfestigkeitsfaktor. Eine Verringerung des Verhaltensbeiwerts hat in der Regel auch eine Verringerung des Überfestigkeitsfaktors zur Folge.

Die Empfehlung der Verhaltensbeiwerte gemäß Tabelle 14.1.1 enthält auch die Empfehlung, die Gipsplatten nach DIN EN 520 als uneingeschränkt anwendbaren Beplankungswerkstoff nach EN 1998-1-1 und DIN 4149 zu betrachten. Es wird die Zuordnung von Scheiben in Holzrahmenbauweise mit dieser Beplankung zur Duktilitätsklasse „DCM“ entsprechend EN 1998-1 und zur Duktilitätsklasse „2“ entsprechend DIN 4149 empfohlen.

Tabelle 14.1.2 Empfehlungen zum Verhaltensbeiwert und zu Überfestigkeitsfaktoren von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2.

Versuch-Nr.	Verhaltensbeiwert $q$	Überfestigkeitsfaktor $\alpha_u$
<b>Prinzip der gleichen Formänderungsarbeit, Scherkörper</b>		
GF-W2-12,5 H-3-2-1	3,76	1,99
GF-W2-15,0 H-3-2-1	4,11	1,62
GF-C1-I-W2-12,5 H-3-2-1	2,79*	1,73*
GF-C1-I-W2-12,5 H-3-2-1-EZ	4,17	1,56
<b>Prinzip der gleichen Formänderungsarbeit, Wandscheiben</b>		
GF-W2-12,5 H-1-1-1	3,91	2,46
GF-W2-15,0 H-1-1-1	3,32	1,97
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-2	4,44	3,39
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-1	4,01	3,39
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-2-2	3,21	2,11
GF-I-W2-C1-12,5 H-1-2-2	3,83	2,77

Fortsetzung Tabelle 14.1.2

Kapazitätsspektrum-Methode		
GF-W2-12,5 H-1-1-1	4,20	2,46
GF-W2-15,0 H-1-1-1	3,29	1,97
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-2	5,80	3,47
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-1	4,80	3,39
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-2-2	4,21	2,34
GF-I-W2-C1-12,5 H-1-2-2	5,27	2,77
<b>Empfehlung für die untersuchten Typen von Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2</b>	<b><math>\leq 3,0</math></b>	<b><math>\geq 2,0</math></b>

)\* Das Ende der zyklischen Versuche wurde nicht erreicht, vgl. Abschnitt 6.4.

Für die untersuchten Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2 konnte auch in Referenz zu Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ gezeigt werden, dass mit Gipsfaserplatten beplankte Wandscheiben in Holzrahmenbauweise über vergleichbare Eigenschaften unter zyklischer Beanspruchung verfügen. Es wurden vergleichbare Versagensmechanismen identifiziert. Daher wird für die hier untersuchten Gipsfaserplatten ein Verhaltensbeiwert  $q \leq 3,0$  und ein Überfestigkeitsfaktor  $\alpha_u \geq 2,0$  empfohlen. Gegebenenfalls können einzelne Plattentypen bessere Eigenschaften bereitstellen, daher sind diese Werte als Grundwerte der hier betrachteten Typen von Gipsfaserplatten anzusehen. Auch ist der Wert abhängig vom verwendeten Bemessungskonzept. Änderungen im Bemessungskonzept haben auch Änderungen der Verhaltensbeiwerte und Überfestigkeitsfaktoren zur Folge.

Weitere Überlegungen im Gesamtkontext dieser Arbeit legen nahe, für die hier betrachteten mit gipsgebundenen Plattenwerkstoffe beplankten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise die Anwendung von Verhaltensbeiwerten an die Anzahl an Fließgelenken, die im Versagensfall eintreten, zu koppeln. Dabei wäre es denkbar, der Ausbildung von einem Fließgelenk den Verhaltensbeiwert  $q = 2,0$  und der Ausbildung von zwei Fließgelenken den Verhaltensbeiwert  $q = 3,0$  zu zuordnen. Dies hätte Gültigkeit für einschnittige Verbindungen von gipsgebundenen Plattenwerkstoffen der hier untersuchten Typen mit einer Holzunterkonstruktion.

## 14.2 Empfehlungen zu Konstruktions- und Bemessungsregeln

Auf Grundlage der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse sollten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit einer Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen nachfolgende Konstruktions- und Bemessungsregeln erfüllen:

Abmessungen:

- Wandscheibenhöhe zwischen 2,30 m und 2,70 m.
- Länge der einzelnen Scheiben  $\leq 1,25$  m.
- Gesamtlänge der Wand  $\geq 1,25$  m.
- Abmessungen entsprechen EN 1995-1-1.
- Scheibe hat eine umlaufende Randrippe.

## Unterkonstruktion:

- Rippen mit einer Breite  $\geq 60$  mm und Höhe  $\geq 100$  mm.
- Holz mit einer Holzfeuchte  $< 18\%$ .
- Holz, das mindestens der Festigkeitsklasse „C24“ nach EN 14081 entspricht.

## Beplankung:

- Gipsplatten nach EN 520 (Typen „DF“, „DFH2IR“ und „DEFH1IR“), Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2 (Typen „DF-W2“, „DF-C1-I-W2“ und „GF-I-W2-C1“).
- Nenndicke der Platten zwischen 12,5 mm und 18,0 mm.
- Beplankungsbreite  $\leq 1,25$  m.
- ein- und beidseitige Beplankung der Wandscheiben.

## Verbindungsmittel:

- Klammern nach EN 1995-1-1 + NAD (beharzte Klammer).
- Nenndurchmesser der Klammern  $\leq 1,53$  mm.
- Zugfestigkeit des Rohdrahts der Klammern  $\leq 1000$  N/mm<sup>2</sup>.

## Abstände:

- Abstand der Klammern untereinander 50 mm bis 150 mm.
- Randabstände an Rand-, Fuß- und Kopfrippen senkrecht zum Plattenrand  $\geq 15d$ .
- Randabstände an Stoßrippen (Plattenstoß) senkrecht zum Plattenrand  $\geq 5d$ .
- sonstige Abstände entsprechend EN 1995-1-1 + NAD.

## Eindringtiefen:

- Eindringtiefe der Klammern in die Unterkonstruktion  $\geq 20d$ .

## Bemessungsregeln:

- EN 1995-1-1 + NAD.
- Bestimmung des Abscherwiderstands  $F_t$  nach EN 1995-1-1, 8.2.2.
- Modifikationsbeiwert beträgt  $k_{mod} = 1,1$ .
- Teilsicherheitsbeiwert beträgt  $\gamma_M = 1,0$ .
- DIN EN 1998-1 und DIN 4149.

## 15 Zusammenfassung und Fazit

### 15.1 Allgemeines

Die Grundlagen der Untersuchungen bilden monotone und zyklische Versuche an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise und Scherkörpern. Dabei wurde eine umfangreiche Anzahl an Versuchen durchgeführt. Zur Auswertung von zyklischen Versuchen wurden Kapazitätskurven entwickelt. Aus den Kapazitätskurven wurden nach dem Prinzip der gleichen Formänderungsarbeit der Verhaltensbeiwert und der Überfestigkeitsfaktor bestimmt. Die Bestimmung erfolgte sowohl an Versuchsergebnissen von Scherkörpern als auch an Versuchsergebnissen von Wandscheiben. Die Versuche wurden als zyklische Versuche mit langsamer Belastungsgeschwindigkeit durchgeführt. Ebenso sollten die Einflüsse der gewählten Randbedingungen auf das zyklische Verhalten bewertet werden. Dazu wurden weitere Versuche an Verbindungsmitteln, einer Wandscheibe mit größerer Scheibenabmessung, einer Wandscheibe mit gekappten Ecken und Wandscheiben mit Messung der Verankerungskraft durchgeführt.

Um das lokale Verhalten der Verbindung zu verstehen, wurde diese ausführlich betrachtet und es wurden wesentliche Mechanismen der Energiedissipation identifiziert. Die Anteile der verschiedenen Mechanismen an der Energiedissipation wurden quantitativ ausgewertet. Es konnte festgestellt werden, dass mit zunehmender Lochleibungsfestigkeit und Rohdichte auch die Energiedissipation zunimmt. Dies ist verbunden mit einem Übergang von der Ausbildung eines Fließgelenks zur Ausbildung von zwei Fließgelenken. Mit dem verwendeten Verbindungsmittel „Klammer“ konnte gezeigt werden, dass sich bei jeder untersuchten Gipsplatte mindestens ein Fließgelenk ausbildet. Ebenso konnte gezeigt werden, dass die Klammer wegen ihres geringen Durchmessers besonders geeignet ist duktile und dissipative Bauteile herzustellen. Es wurden Grenzwerte der Lochleibungsfestigkeit zur Ausbildung von Fließgelenken bestimmt. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass bei Ausbildung von zwei Fließgelenken am Verbindungsmittel, mit zunehmendem Abstand dieser, das Energiedissipationsvermögen der Verbindung tendenziell zunimmt. Aus den gewonnenen Erkenntnissen konnte ein Modell abgeleitet werden, welches zwischen Erst- und Wiederbelastung unterscheidet und numerisch die Versuche an Scherkörpern abbilden kann. Es konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass die Klammer im Vergleich zu anderen üblichen Verbindungsmitteln als geeignet zu betrachten ist und ein hohes Maß an Duktilität im Vergleich zu geringten Nägeln oder Schrauben bereitstellt.

Aufgrund der Geometrie, die beim Versagen einer Wandscheibe in Holzrahmenbauweise einen größeren Einfluss hat als bei kleinteiligen Scherkörpern, müssen die Ergebnisse aus den Versuchen an Wandscheiben bei der Bewertung der Versuche zur Bestimmung von Verhaltensbeiwerten und Überfestigkeitsfaktoren berücksichtigt werden. Scherkörper zeigen das punktuelle (lokale) Verhalten einer einzelnen Verbindung an. Das Versagen der Scherkörper kann hinsichtlich der Ausbildung von Fließgelenken in der Verbindung sehr genau untersucht werden und liefert Erkenntnisse über das grundsätzliche Verhalten der Verbindung. Es wird das Verhalten unter einer definierten Kraft und Translation betrachtet. Einflüsse aus z.B. Bauteilabmessungen und exzentrischer Lasteinleitung, wie sie bei Versuchen an Wandscheiben auftreten, sind nahezu ausgeschlossen. Ein zeitlich versetztes Versagen - es ist abhängig von der erreichten Verschiebung - einzelner Verbindungen einer Beplankung mit einer Unterkonstruktion eines Holzrahmenbauteils kann mit einer punktuellen Betrachtung nicht abgebildet werden. Dies ist von Bedeutung, da ein Versagen der Verbindungen im Eckbereich der Wandscheiben in Holzrahmenbauweise innerhalb noch ansteigender Reaktionskraft der Wandscheibe stattfindet. Daher kann eine Beurteilung des Bauteils aufgrund der Beurteilung der einzelnen Verbindung oder einzelner Bestandteile zu einer Fehleinschätzung des Bauteils hinsichtlich seiner zyklischen Eigenschaften führen. Grundsätzlich ist dieses versetzt stattfindende Versagen als positiv zu bewerten, da dem Versagen einen ausgeprägtes Fließen vorausgeht und das Versagen selbst mit großen Verformungen verbunden ist. Die an Komponenten des Bauteils ermittelten Eigenschaften und Verhaltensbeiwerte sind auch am Bauteil selbst nachzuweisen. Hierzu wurden Verhaltensbeiwerte und Überfestigkeitsfaktoren nach dem Prinzip der gleichen Formänderungsarbeit durch Versuche an

Wandscheiben in Holzrahmenbauweise bestimmt. Im weiteren Verlauf wurden diese Werte im Rahmen einer Bewertung nach der Kapazitätsspektrum-Methode verifiziert. Es wurden die Ankerkräfte den wirkenden Horizontalkräften gegenübergestellt. Die fortschreitende Schädigung der Wandscheibe führte dabei nicht zu weiteren anzunehmenden Überfestigkeiten für die Verankerung. Das mechanische Modell zur Bestimmung der Ankerkräfte kann im Erdbebenfall weiterhin angenommen werden.

Um das Vermögen einzuordnen Erdbebenbeanspruchungen zu widerstehen, wurden Referenz-Untersuchungen an Wandscheiben mit einer Beplankung aus Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass zwischen den untersuchten Beplankungen aus Gipsfaserplatten und Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“ hinsichtlich der in dieser Publikation untersuchten Eigenschaften kein wesentlicher Unterschied besteht. Lediglich die untersuchten Gipsplatten des Typ „DF“ weisen ein weniger dissipatives Verhalten auf als „OSB/4“. An den untersuchten Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Gipsplatten des Typ „R“ (mit erhöhter Festigkeit) konnte ein größeres Dissipationsvermögen als an Wandscheiben mit Beplankung aus Gipsplatten des Typs „DF“ festgestellt werden. Hier musste allerdings auch festgestellt werden, dass das derzeitige Bemessungsverfahren nach DIN EN 1995-1-1 + NA das Tragverhalten nicht ausreichend abbildet und eine Bewertung daher schwierig ist. Abschließend wurde festgestellt, dass eine größere Breite der Platte, die zur Beplankung einer Wandscheibe in Holzrahmenbauweise verwendet wird, einen größeren Einfluss auf die duktilen Eigenschaften hat als der zur Beplankung verwendete Plattentyp selbst.

## 15.2 Grenzen und Randbedingungen der Untersuchungen

Durch den äußerst steifen Versuchsaufbau zur Untersuchung der Wandscheiben in Holzrahmenbauweise wurde lediglich der Beplankung und der Verbindung die Möglichkeit zur Energiedissipation gegeben. Effekte aus „Rocking“ oder nachgiebigen Schub- und Zugankern waren ausgeschlossen. Diese würden die Duktilität deutlich erhöhen. Im realen Bauzustand ist daher von duktilerem Verhalten auszugehen. Daher sind die Ergebnisse der Untersuchungen als geringstes Maß an Duktilität der Holzrahmenbauwand zu betrachten.

Auch die Wahl der Querschnitte der Rippen und die Kombinationen der Verbindungsmittel und ihrem Abstand wurden in der Regel ungünstig hinsichtlich einem duktilen Verhalten gewählt. Es war vorrangiges Ziel, ein möglichst sprödes Versagen zu provozieren. Für die Versuche wurden Klammern als Verbindungsmittel gewählt. Daher gelten die hier getroffenen Aussagen nur für Verbindungen, die mit Klammern des maximalen Nenndurchmessers 1,53 mm hergestellt werden.

Bei der Bestimmung der Dämpfung wurde lediglich die Energiedissipation aus der Wiederbelastung berücksichtigt. Die Energiedissipation aufgrund der Deformation der Lochwandung wurde für die Bestimmung der Dämpfung nicht berücksichtigt. Ebenso wurde festgestellt, dass Versuche ohne Auflast die Werte der Energiedissipation und Dämpfung reduzieren. Auch dies sind weitere konservative Ansätze zur Bestimmung der Eigenschaften unter zyklischer Beanspruchung.

Die Erkenntnisse wurden unter den Rahmenbedingungen der Bemessungskonzepte von DIN EN 1995-1-1 + NA und DIN EN 1998-1 betrachtet. Die auf dieser Basis bestimmten Werte und Faktoren gelten daher nur für die Anwendung innerhalb dieser Bemessungskonzepte.

### 15.3 Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass auch mit gipsgebundenen Platten beplankte Wandscheiben in Holzrahmenbauweise ein nichtlineares Tragverhalten unter Erdbebenbeanspruchung bereitstellen. Dieses ist bei Verwendung von Gipsplatten nach DIN EN 520 geringer als bei Verwendung von Holzwerkstoffplatten des Typs „OSB/4“. Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Gipsfaserplatten hingegen konnten vergleichbare Eigenschaften aufzeigen, wie sie bei Wandscheiben mit Beplankung aus „OSB/4“ zu finden sind.

Im Rahmen dieser Arbeit konnten eine grundsätzliche Möglichkeit zur Bildung eines Material- und Bauteilmodells aufgezeigt und die dafür notwendigen Parameter bestimmt werden. Die Schädigung wurde bei der Modellbildung berücksichtigt. Mit dem Modell besteht die Möglichkeit, weitere Parameterstudien durchzuführen und das Modell anhand von weiteren Versuchen zu kalibrieren. Es können Berechnungen an Gebäudemodellen nach dem Verfahren nach DIN EN 1998-1 und DIN EN 1995-1-1 + NA durchgeführt werden und mit Simulationsrechnungen auf Basis des Material- oder Bauteilmodells verglichen werden.

Für die Bemessung im Lastfall Erdbeben wurden Verhaltensbeiwerte, Überfestigkeitsfaktoren und Werte der Dämpfung bestimmt und zur Anwendung empfohlen. Mit diesen Werten können Nachweise an Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen für den Lastfall Erdbeben unter Berücksichtigung nichtlinearen Verhaltens geführt werden. Für diese Wandscheiben in Holzrahmenbauweise besteht damit eine erste Grundlage, anhand derer Bemessungen in der täglichen Praxis eines Ingenieurs durchgeführt werden können.

Für die Durchführung zukünftiger Versuche zur Bestimmung der duktilen Eigenschaften an Verbindungen oder Bauteilen mit gipsgebundenen Plattenwerkstoffen im Holzbau konnten die Angaben zur Versuchsdurchführung und Auswertung präzisiert und erweitert werden. Für die Beurteilung von gipsgebundenen Plattenwerkstoffen als Beplankung von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise, die hinsichtlich der duktilen Eigenschaften weiterentwickelt werden sollen, steht damit eine umfangreiche Kenntnis zur Durchführung von Versuchen zur Bestimmung des duktilen Verhaltens zur Verfügung. Diese Kenntnis kann prinzipiell auch für Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus Plattenwerkstoffen auf Basis anderer Materialien zur Beurteilung des duktilen Verhaltens angewendet werden.

Die in Ansatz gebrachte Überlegung zur Kopplung der Verhaltensbeiwerte an den Versagensmechanismus der einschnittigen Verbindung wäre in einer weiteren Untersuchung auf alle gipsgebundenen Plattenwerkstoffe und wünschenswerterweise auch auf Holzwerkstoffplatten und sonstige zur Beplankung von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise verwendeten Plattenwerkstoffe zu übertragen. Damit wäre für den praktischen Ingenieur ein einheitliches und einfaches Vorgehen zur Bestimmung des Verhaltensbeiwerts gegeben.

Darüber hinaus ergeben sich Fragestellungen zu konstruktiven Details wie z.B. der Einfluss der Ausbildung von verschiebungsbehinderten Plattenrändern. Diese ergeben sich z.B. durch die flächige Auflagerung von Decken. Hier könnte eine vergleichende Untersuchung von Wandscheiben mit behinderter und unbehinderter Verschiebung der Plattenränder weitere Erkenntnisse liefern.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Fragen zum zugrunde gelegten mechanischen Modell, die sich aus den festgestellten Versagensformen und den Differenzen zwischen rechnerischem Modell und Versuch ergeben haben, lediglich angerissen. Dazu wären weitere Untersuchungen wünschenswert, die ein vom Schubfeld-Modell abweichendes Modell für die Bemessung von Wandscheiben in Holzrahmenbauweise mit Beplankung aus gipsgebundenen Plattenwerkstoffen betrachten.





## 16 Literaturverzeichnis

### 16.1 Veröffentlichungen

- [1] Bachmann, H., Erdbebensicherung von Bauwerken – 2., überarbeitete Auflage, Birkhäuser Verlag, 2002, Basel
- [2] Kawei, N.: Pseudo-dynamic tests on shear walls. Proceed. 5th WCTE, Vol. 1, Lausanne, 1998
- [3] Forschungsvorhaben „Optimber Quake“, CORNET, gefördert durch AIF, BMWi und SPW, 2014
- [4] Forschungsvorhaben „Sofie“, IVALLSA (istituto per la valorizzazione del legno e delle specie arboree), Autonomous Province of Trento, in cooperation with the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED), Shizuoka University, Building Research Institute (BRI) and Centre for Better Living in Japan, 2008
- [5] Abschlussbericht Forschungsvorhaben „Experimentelle Untersuchung des nichtlinearen Tragverhaltens zusammengesetzter Schubwandquerschnitte aus unbewehrtem Mauerwerk unter Erdbebenbelastung“, Technische Universität München – Institut für Baustoffe und Konstruktion – Lehrstuhl für Massivbau, Zilch, Grabowski, Scheufler, September 2008
- [6] Branco, Cruz, Piazza und Varum, „Modelling of timber joints in traditional structures“, International Workshop on „Earthquake Engineering on Timber Structures“, Coimbra (Portugal), November 2006
- [7] Meskouris und Hinzen, „Bauwerke und Erdbeben“, Vieweg Verlag, Wiesbaden, Juni 2003
- [8] Chopra, „Dynamics of Structures“, Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2000
- [9] Mahrenholtz, Bachmann, „Vibration Problems in Structures – Damping“, Birkhäuser Verlag, Basel-Berlin-Boston, 1997
- [10] Schädle, P., „Innovative Wandbausysteme aus Holz unter Erdbeneinwirkung“ Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.J. Bläß, 2012
- [11] Tichelmann, K., „Tragverhalten von hybriden Systemen in Leichtbauweise mit Gipswerkstoffplatten“, Kölner Wissenschaftsverlag, Köln, 2006
- [12] Johansen, K.W., „Theory of timber connections“, IABSE publications (Bibliothek ETH-Zürich), 1949
- [13] Pocanschi, A., Phocas, M.C., „Kräfte in Bewegung – Die Techniken des erdbebensicheren Bauens“, B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2003
- [14] Krawinkler, H. et al., „Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration“, Earthquake engineering and Structural Dynamics 34, 1489-1511, 2005
- [15] Bundesverband der Gipsindustrie e.V., „Gips-Datenbuch“, Berlin, 2013
- [16] Pfau J., Radovic B., „Die Reifeprüfung für die Gipsplatte“, bauen mit holz 8/2005, Bruderverlag, Karlsruhe, 2005
- [17] Munoz W. et al, „Need for a harmonized approach for calculations of ductility of timber assemblies“ International council for research and innovation in building and construction – WC 18, Meeting Forty one St. Andrews, Canada, 2008
- [18] Yamaguchi, N., Karacabeyli, E., Minowa, C., Kawei, N., Watanabe, K., Nakamura, I., „Seismic performance of nailed wood-frame shear walls“, World conference on timber engineering, Whistler Resort, British Columbia, Canada, 2000
- [19] Yasumura, Motoi, „Seismic performance of timber structures – Japanese experience and design codes –“ Proceeding of the workshop „Earthquake risks? More safety with timber constructions!“, Munich, 20<sup>th</sup> January 2005

- [20] Pfau, Jochen, „Befestigungstechnik mit ballistischen Verbindungsmitteln – zur rationellen Erstellung tragender Tafелеlemente in Stahlprofil-Leichtbauweise“, mensch & buch verlag, Berlin, 2007
- [21] Lange, J., Naujoks, B., „Behaviour of cold-formed steel shear walls und horizontal and vertical loads“, Elsevier – Thin-walled structures, 28th February 2007
- [22] De Matteis, G., Landolfo R., „Mechanical fasteners for cladding sandwich panels: Interpretative models for shear behavior“, Elsevier – Thin-walled structures, 1999
- [23] Memari, Ali M., Solnosky, Ryan L., „In-plane shear performance of wood-framed drywall sheathing wall systems under cyclic racking loading“, Open journal of civil engineering, 2014
- [24] Knauf Gips KG, „Knauf Seismic Design – Edition 08/2004“, Iphofen, 2004
- [25] Rainer, J. Hans, Karacabeyli, Erol, „Wood-frame construction in past earthquakes“ Proceed. WCTE 2000, Vol. 1, Whistler Resort, 2000
- [26] Rainer, J. Hans, Lepper, Peggy, Karacabeyli, Erol, „Seismic performance of conventional wood-frame buildings“, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, August 2006
- [27] Becker, K., Zeitter, H. „Untersuchung der dynamischen und duktilen Eigenschaften von mechanischen Verbindungsmitteln im Hinblick auf die Beschreibung der Eigenschaften in den europäischen Regelwerken (EC 8)“, Fraunhofer IRB Verlag, Juni 1993
- [28] Becker, K., Zeitter H. „Erarbeitung spezifischer Konstruktionsregeln für verschiedene Holzbauweisen und Tragsysteme aus dem Holzbau für den Entwurf des EC8, Teil 1.3, Kap. 5“, Fraunhofer IRB Verlag, Juni 1993
- [29] Becker, K., Zeitter H. „Harmonisierung europäischer Baubestimmungen – Bauwerke in Erdbebengebieten. Holzbau – Theoretische und experimentelle Untersuchungen für die Anwendung des EC8“, Fraunhofer IRB Verlag, August 1992
- [30] Becker, K., Zeitter H. „Sammlung und Entwicklung von konstruktiven Regeln für Rahmen und Rahmentragwerke aus Holz unter erdbebentechnischen Gesichtspunkten zur Rationalisierung des Planungsaufwandes sowie zur Senkung der Baukosten“, Fraunhofer IRB Verlag, Februar 1995
- [31] Dean, J.A., Stewart, W.G., Carr, A.J. „The seismic behaviour of plywood sheathed shearwalls“, Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, vol. 19, No. 1, March 1986
- [32] Vogt, T. „Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Beschreibung des Trag- und Verformungsverhaltens von Holzrahmenwänden unter Berücksichtigung lokaler Effekte“, kassel university press, November 2014
- [33] Arnold, Andrew Eric, Uang, Chia-Ming, Filiatrault, Andre „Cyclic behavior and repair of stucco and gypsum woodframe walls: phase I“, CUREE Department of structural engineering – University of California, San Diego, May 2003
- [34] Arnold, Andrew Eric, Uang, Chia-Ming, Filiatrault, Andre „Cyclic behavior and repair of stucco and gypsum woodframe walls: phase II“, CUREE Department of structural engineering – University of California, San Diego, September 2003
- [35] McMullin, Kurt M., Merrick, Dan „Seismic performance of gypsum walls: Experimental test program“ CUREE San Jose State University, San Jose, California, 2002
- [36] Fonseca, Fernando S., Rose, Sterling K., Campbell, Scott H. „Nail, wood screw and staple fastener connections“ CUREE Brigham Young University, Provo, Utah, 2002
- [37] Deierlein, Gregory G., Kanvinde, Amit M. „Seismic performance of gypsum walls – analytical investigations“ CUREE Department of civil and environmental engineering – Stanford University, 2003
- [38] Krawinkler, Helmut, Parisi, Francisco, Ibarra, Luis, Ayoub, Ashraf, Medina, Ricardo „Development of a testing protocol for woodframe structures“ CUREE Department of structural engineering – Stanford University, 2001

## 16.2 Normen

DIN EN 409:2009-08	„Holzbauwerke - Prüfverfahren - Bestimmung des Fließmoments von stiftförmigen Verbindungsmitteln“
DIN EN 520:2009-12	„Gipsplatten - Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren“
DIN EN 594:2011-09	„Holzbauwerke - Prüfverfahren - Wandscheiben-Tragfähigkeit und -Steifigkeit von Wandelementen in Holztafelbauart“
DIN EN 1156:2013-10	„Holzwerkstoffe - Bestimmung von Zeitstandfestigkeit und Kriechzahl“
DIN EN 1995-1-1:2010-12	„Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau“
DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08	„Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau“
DIN EN 1998-1:2010-12	„Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten“
DIN EN 12512:2005-12	„Holzbauwerke – Prüfverfahren - Zyklische Prüfungen von Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln“
DIN EN 14592:2009-02	„Holzbauwerke - Stiftförmige Verbindungsmittel – Anforderungen“
DIN EN 15283-2:2009-12	„Faserverstärkte Gipsplatten - Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren - Teil 2: Gipsfaserplatten“
DIN 4074-1:2012-06	„Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadel-schnittholz“
DIN 4149:2005-04	„Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten“
DIN 18180:2014-09	„Gipsplatten - Arten und Anforderungen“
ISO 16670:2003-12	„Timber structures – Joints made with mechanical fasteners – Quasi-static reversed-cyclic test method“
FEMA 273/October 1997	„NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings“, Building Seismic Safety Council, October 1997, Washington, D.C.
ATC-40	„Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume 1“, Applied Technology Council, Redwood City, California, November 1996

## 16.3 Sonstige Quellen

ETA 12/0354	„BeFIX SK, BeFIX TK, BeFIX TKD and BeFIX HVV - Self-tapping screws for use in timber structures“, Johann Friedrich Behrens AG, 2013
ETA 08/0147	„Rigidur H Gipsfaserplatte – Gipsfaserplatten zur Beplankung und Bekleidung von Bauteilen“, Saint-Gobain Rigips GmbH, 2013
ETA 03/0050	„FERMACELL – Gipsfaserplatten – „FERMACELL Gipsfaser-Platte“ – „FERMACELL Vapor“, „FERMACELL Gipsfaserplatte-greenline“ – FERMACELL Fibre gypsum boards - Gipsfaserplatten zur Beplankung und Bekleidung von Bauteilen“, Xella Trockenbau-Systeme GmbH, 2013
ETA 07/0086	„Vidiwall – KNAUF-Gipsfaserplatten für die Beplankung und Bekleidung von Bauteilen“, KNAUF Bulgaria EOOD, 2013
ETA 13/0800	„Knauf Diamant – Gipsplatte für tragende Anwendung“, Knauf Gips KG, 2013
ETA 14/0312	„LaPlura Plus – Gypsum plasterboards for load-bearing applications“, Siniat GmbH, 2014
PB-644/07/Rä	Prüfbericht „PB-644/07/Rä“ der Versuchsanstalt für Holz- und Trockenbau vom 21.11.2007, Darmstadt
PB-645/07/Rä	Prüfbericht „PB-645/07/Rä“ der Versuchsanstalt für Holz- und Trockenbau vom 21.12.2007, Darmstadt
PB-650-I/07/Rä	Prüfbericht „PB-650-I/07/Rä“ der Versuchsanstalt für Holz- und Trockenbau vom 10.10.2008, Darmstadt
PB-635-08-II/Rä	Prüfbericht „PB-635-08-II/Rä“ der Versuchsanstalt für Holz- und Trockenbau vom 25.02.2009, Darmstadt
PB-560-11-Rae	Prüfbericht „PB-560-11-Rae“ der Versuchsanstalt für Holz- und Trockenbau vom 03.03.2012, Darmstadt
TR-698-13-Siniat_EN12512-140610	Prüfbericht „TR-698-13-Siniat_EN12512-140610“ der Versuchsanstalt für Holz- und Trockenbau vom 10.06.2014, Darmstadt
G-768-15 Knauf Diamant X-151029	Gutachterliche Stellungnahme „G-768-15 Knauf Diamant X-151028“ der Versuchsanstalt für Holz- und Trockenbau vom 29.10.2015, Darmstadt

## 16.4 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation sind folgende Studienarbeiten angefertigt worden:

Benjamin Bohrmann	Untersuchung schubfester Verbindungen von Beplankungsändern im Holzbau; Bestimmung der Eigenschaften bei zyklischer Beanspruchung, 2010
Martin Gräfe	Modellierung von Wandtafeln in Holzrahmenbauweise zur Untersuchung des Verhaltens bei seismischer Beanspruchung, 2011
Steffen Müller-Braun	Untersuchung des Verhaltens stiftförmiger Verbindungen von Plattenwerkstoffen und Unterkonstruktion im Holzbau unter zyklischer Beanspruchung, 2012
Christof Günther	Untersuchung des Energiedissipationsvermögens stiftförmiger Verbindungsmittel im Holzbau, 2013



## 17 Anhang

## Anhang A Übersicht der durchgeführten Versuche

Tabelle A.1 Versuchsumfang an Scherkörpern mit einer Beplankung aus Gipsplatten nach DIN EN 520 und DIN 18180. Versuche in Anlehnung an DIN EN 12512.

Versuch Nr.	Anzahl	Werkstoff / Beplankung	Verbindungs- mittel	Verbindungsmittel- abstand	Belastung
Gipsplatten Typ „DF“					
DF-12,5 H-2-2-1	3	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 12,5 mm	Klammer 1,53 x 50	50 mm	monoton
DF-18,0 H-2-2-1	3	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 18,0 mm	Klammer 1,53 x 50	50 mm	monoton
DF-12,5 H-3-2-1	6	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 12,5 mm	Klammer 1,53 x 50	50 mm	zyklisch
DF-18,0 H-3-2-1	6	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 18,0 mm	Klammer 1,53 x 50	50 mm	zyklisch
Gipsplatten Typ „DFH2IR“					
DFH2IR-12,5 H-2-2-1	3	Gipsplatte Typ DFH2IR Nenndicke 12,5 mm	Klammer 1,53 x 50	50 mm	monoton
DFH2IR-15,0 H-2-2-1	3	Gipsplatte Typ DFH2IR Nenndicke 15,0 mm	Klammer 1,53 x 50	50 mm	monoton
DFH2IR-12,5 H-3-2-1	6	Gipsplatte Typ DFH2IR Nenndicke 12,5 mm	Klammer 1,53 x 50	50 mm	zyklisch
DFH2IR-15,0 H-3-2-1	6	Gipsplatte Typ DFH2IR Nenndicke 15,0 mm	Klammer 1,53 x 50	50 mm	zyklisch
Gipsplatten Typ „DEFH1IR“					
DEFH1IR-12,5 H-2-2-1	3	Gipsplatte Typ DEFH1IR Nenndicke 12,5 mm	staple 1,53 x 50	50 mm	monoton
DEFH1IR-12,5 H-3-2-1	6	Gipsplatte Typ DEFH1IR Nenndicke 12,5 mm	staple 1,53 x 50	50 mm	zyklisch

Tabelle A.2 Versuchsumfang an Scherkörpern mit einer Beplankung aus Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2. Versuche in Anlehnung an DIN EN 12512.

Versuch Nr.	Anzahl	Werkstoff / Beplankung	Verbindungs- mittel	Verbindungsmittel- abstand	Belastung
Gipsfaserplatten Typ „GF-W2“					
GF-W2-12,5 H-2-2-1	3	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 Nenndicke 12,5 mm	Klammer 1,53 x 50	50 mm	monoton
GF-W2-15,0- H-2-2-1	3	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 Nenndicke 15,0 mm	Klammer 1,53 x 50	50 mm	monoton
GF-W2-12,5 H-3-2-1	6	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 Nenndicke 12,5 mm	Klammer 1,53 x 50	50 mm	zyklisch
GF-W2-15,0 H-3-2-1	6	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 Nenndicke 15,0 mm	Klammer 1,53 x 50	50 mm	zyklisch
Gipsfaserplatten Typ „GF-C1-I-W2“					
GF-C1-I-W2-12,5 H-2-2-1	3	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm	Klammer 1,53 x 50	50 mm	monoton
GF-C1-I-W2-12,5 H-3-2-1	6	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm	Klammer 1,53 x 50	50 mm	zyklisch
GF-C1-I-W2-12,5 H-3-2-1-EZ	1	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm	Klammer 1,53 x 50	(je Scherfuge eine Klammer)	zyklisch (Erweiterung der Zyklen)



Tabelle A.3 Versuchsumfang an Wandscheiben mit einer Beplankung aus Gipsplatten nach DIN EN 520 und DIN 18180. Versuche in Anlehnung an DIN EN 12512 und DIN EN 594.

Versuch Nr.	Anzahl	Werkstoff / Beplankung	Verbindungs- mittel	Verbindungsmittel- abstand	Belastung	Auflast
Gipsplatten Typ „DF“						
DF-12,5 H-0-2-2	2	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 12,5 mm beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	monoton	16 kN/m
DF-12,5 H-1-2-1	3	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 12,5 mm beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch	ohne
DF-12,5 H-1-2-2	3	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 12,5 mm beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch	16 kN/m
DF-18,0 H-1-2-2	3	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 18,0 mm beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch	16 kN/m
Gipsplatten Typ „DFH2IR“						
DFH2IR-12,5 H-0-2-2	2	Gipsplatte Typ DFH2IR Nenndicke 12,5 beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	monoton	16 kN/m
DFH2IR-12,5 H-1-2-2	3	Gipsplatte Typ DFH2IR Nenndicke 12,5 beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch	16 kN/m
DFH2IR-12,5 H-1-1-2	1	Gipsplatte Typ DFH2IR Nenndicke 12,5 einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch	16 kN/m
Gipsplatten Typ „DEFH1IR“						
DEFH1IR-12,5 H-0-1-1	1	Gipsplatte Typ DEFH1IR Nenndicke 12,5 einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	monoton	ohne
DEFH1IR-12,5 H-1-1-1	3	Gipsplatte Typ DEFH1IR Nenndicke 12,5 einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch	ohne

Tabelle A.4 Versuchsumfang an Wandscheiben mit einer Beplankung aus Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2. Versuche in Anlehnung an DIN EN 12512 und DIN EN 594.

Versuch Nr.	Anzahl	Werkstoff / Beplankung	Verbindungs- mittel	Verbindungsmittel- abstand	Belastung	Auflast
Gipsfaserplatten Typ „GF-W2“						
GF-W2-12,5 H-0-1-1	1	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	monoton	ohne
GF-W2-15,0 H-0-1-1	1	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 Nenndicke 15,0 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	monoton	ohne
GF-W2-12,5 H-1-1-1	3	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch	ohne
GF-W2-15,0 H-1-1-1	1	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 Nenndicke 15,0 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch	ohne
Gipsfaserplatten Typ „GF-C1-I-W2“						
GF-C1-I-W2-12,5 H-0-1-2	1	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	monoton	16 kN/m
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-2	3	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch	16 kN/m
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-1	3	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch	ohne
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-2-2	1	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch	16 kN/m
Gipsfaserplatten Typ „GF-I-W2-C1“						
GF-I-W2-C1-12,5 H-1-2-2	1	Gipsfaserplatte Typ GF-I-W2-C1 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 45	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch	16 kN/m

Tabelle A.5 Versuchsumfang an Referenz-Wandscheiben mit einer Beplankung aus Holzwerkstoffplatten nach DIN EN 13986. Versuche in Anlehnung an DIN EN 12512 und DIN EN 594.

Versuch Nr.	Anzahl	Werkstoff / Beplankung	Verbindungs- mittel	Verbindungsmittel- abstand	Belastung	Auflast
Holzwerkstoffplatten Typ „OSB“						
OSB-12,0 H-1-1-1-50	1	Holzwerkstoffplatte OSB/4 Nenndicke 12,0 mm (1,25x2,50) einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch	ohne
OSB-12,0 H-1-1-1-50-k	1	Holzwerkstoffplatte OSB/4 Nenndicke 12,0 mm (1,25x2,50) einseitige Beplankung Ecken gekappt	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch	ohne
OSB-12,0 H-1-1-1-150	1	Holzwerkstoffplatte OSB/4 Nenndicke 12,0 mm (1,25x2,50) einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	150 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch	ohne
OSB-12,0 H-1-1-1-100	1	Holzwerkstoffplatte OSB/4 Nenndicke 12,0 mm (1,25x2,50) einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	100 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch	ohne
OSB-15,0 H-1-1-1-50-g	1	Holzwerkstoffplatte OSB/4 Nenndicke 15,0 mm (2,50x2,50) einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	zyklisch	ohne

## Anhang B Weggesteuerter zyklischer Versuchsablauf

Tabelle B.1 Versuchsablauf für die Scherkörperversuche.

Amplituden der Verschiebung					
<b>Zyklus 1 – 2</b>					
+ 0,25 $\mu_y$	- 0,25 $\mu_y$	+ 0,50 $\mu_y$	- 0,50 $\mu_y$		
<b>Zyklus 3 - 5</b>					
+ 0,75 $\mu_y$	- 0,75 $\mu_y$	+ 0,75 $\mu_y$	- 0,75 $\mu_y$	+ 0,75 $\mu_y$	- 0,75 $\mu_y$
<b>Zyklus 6 - 8</b>					
+ 1,00 $\mu_y$	- 1,00 $\mu_y$	+ 1,00 $\mu_y$	- 1,00 $\mu_y$	+ 1,00 $\mu_y$	- 1,00 $\mu_y$
<b>Zyklus 9 - 11</b>					
+ 2,00 $\mu_y$	- 2,00 $\mu_y$	+ 2,00 $\mu_y$	- 2,00 $\mu_y$	+ 2,00 $\mu_y$	- 2,00 $\mu_y$
<b>Zyklus 12 - 14</b>					
+ 4,00 $\mu_y$	- 4,00 $\mu_y$	+ 4,00 $\mu_y$	- 4,00 $\mu_y$	+ 4,00 $\mu_y$	- 4,00 $\mu_y$
<b>Zyklus 15 - 17</b>					
+ 6,00 $\mu_y$	- 6,00 $\mu_y$	+ 6,00 $\mu_y$	- 6,00 $\mu_y$	+ 6,00 $\mu_y$	- 6,00 $\mu_y$
<b>Zyklus 18 - 20</b>					
+ 8,00 $\mu_y$	- 8,00 $\mu_y$	+ 8,00 $\mu_y$	- 8,00 $\mu_y$	+ 8,00 $\mu_y$	- 8,00 $\mu_y$
<b>Zyklus 21 - 23</b>					
+ 10,00 $\mu_y$	- 10,00 $\mu_y$	+ 10,00 $\mu_y$	- 10,00 $\mu_y$	+ 10,00 $\mu_y$	- 10,00 $\mu_y$

## Anhang C Zyklische Verbindungsmittelversuche

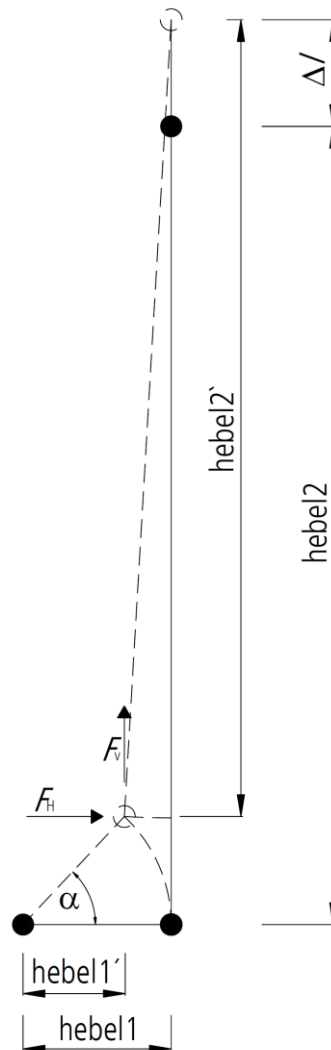


Bild C.1 Abbildung der geometrischen Zusammenhänge der Versuchseinrichtung zur zyklischen Untersuchung des Fließmoments.

Nachfolgend sind die Formeln zur Bestimmung der Biegewinkel und Momente zusammengestellt.

$$\sin \alpha = \left( \frac{\Delta l}{\text{hebel1}} \right) \quad (6.5)$$

$$\text{hebel1}' = \text{hebel1} \cdot \cos \alpha \quad (6.6)$$

$$\text{hebel2}' = \sqrt{\text{hebel2}^2 - (\text{hebel1} - \text{hebel1}')^2} \quad (6.7)$$

$$\sin \beta = \frac{\text{hebel1} - \text{hebel1}'}{\text{hebel2}} \quad (6.8)$$

$$F_V = F_{\text{Prüfmaschine}} \quad (6.9)$$

$$F_H = F_V \cdot \frac{\text{hebel1} - \text{hebel1}'}{\text{hebel2}'} \quad (6.10)$$

$$M = F_V \cdot \text{hebel1}' - F_H \cdot \Delta l \quad (6.11)$$

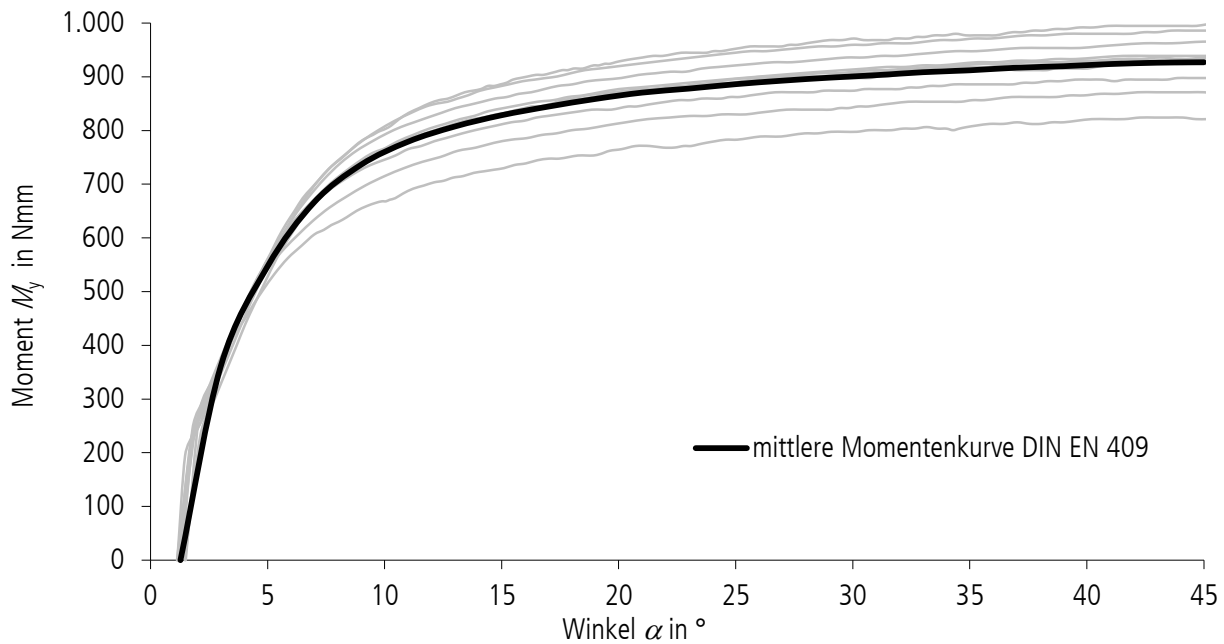


Bild C.2 Bestimmung der mittleren Momentenkurve aus Versuchen nach DIN EN 409 an Klammern BeA Typ 180/65. Schwarz abgebildet ist die mittlere Momentenkurve, die aus den grau hinterlegten einzelnen Momentenkurven bestimmt wurde.

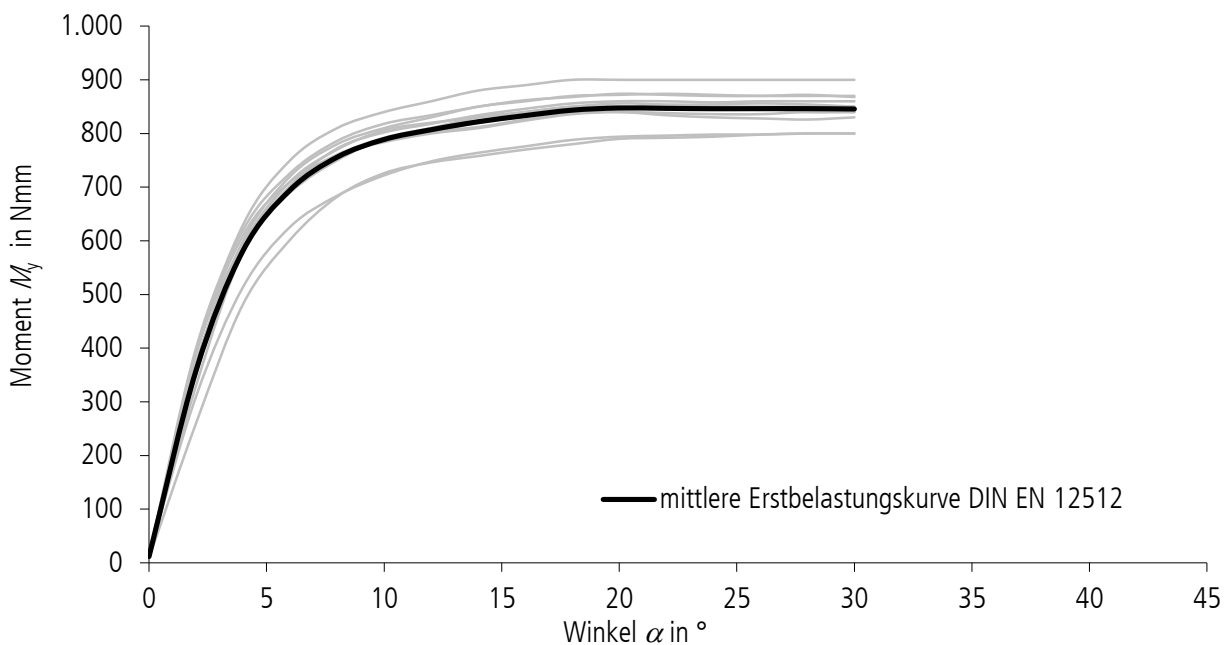


Bild C.3 Bestimmung der mittleren Erstbelastungskurve aus Versuchen nach DIN EN 12512 an Klammern BeA Typ 180/65. Schwarz abgebildet ist die mittlere Erstbelastungskurve, die aus den grau hinterlegten einzelnen Erstbelastungskurven bestimmt wurde.

## Anhang D Annahmen zur Kapazitätsspektrum-Methode

Tabelle D.1 Angenommene Anfangssteifigkeit  $K_{el}$  und viskose Dämpfung  $\xi$  der Untersuchungen an Wandscheiben zur Untersuchung mit der Kapazitätsspektrum-Methode.

Versuch-Nr.	Werkstoff / Beplankung	Verbindungs- mittel	Verbindungsmittel- abstand	viskose Dämpfung* $\xi$	Anfangssteifigkeit $K_{el}$ [N/mm]
<b>Gipsplatten</b>					
DF-12,5 H-1-2-1	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 12,5 mm beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	0,12	1.400
DF-12,5 H-1-2-2	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 12,5 mm beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	0,14	1.400
DF-18,0 H-1-2-2	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 18,0 mm beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	0,12	1.400
DFH2IR-12,5 H-1-2-2	Gipsplatte Typ DFH2IR Nenndicke 12,5 beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	0,14	2.500
DFH2IR-12,5 H-1-1-2	Gipsplatte Typ DFH2IR Nenndicke 12,5 einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	0,13	2.000
DEFH1IR-12,5 H-1-1-1	Gipsplatte Typ DEFH1IR Nenndicke 12,5 einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	0,12	3.500
<b>Gipsfaserplatten</b>					
GF-W2-12,5 H-1-1-1	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	0,10	3.500
GF-W2-15,0 H-1-1-1	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 Nenndicke 15,0 mm einseitige Belankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	0,10	3.500
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-2	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	0,12	3.600
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-1	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	0,09	3.600
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-2-2	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	0,13	7.000
GF-I-W2-C1-12,5 H-1-2-2	Gipsfaserplatte Typ GF-I-W2-C1 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 45	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	0,13	3.500

\*) Die viskose Dämpfung wurde im 3. Zyklus eines Zyklenkollektivs bestimmt.

Tabelle D.2 Eingangswerte Antwortspektrum nach EN 1998-1, Abschnitt 3.2.2.2.

Baugrundklasse	-		A
Bemessungswert der Bodenbeschleunigung	$a_g$	[m/s <sup>2</sup> ]	3,47
Bedeutungsbeiwert	$\gamma_I$		1,0
Verstärkungsbeiwert	$\beta_0$		2,5
Untergrundparameter	$S$		1,0

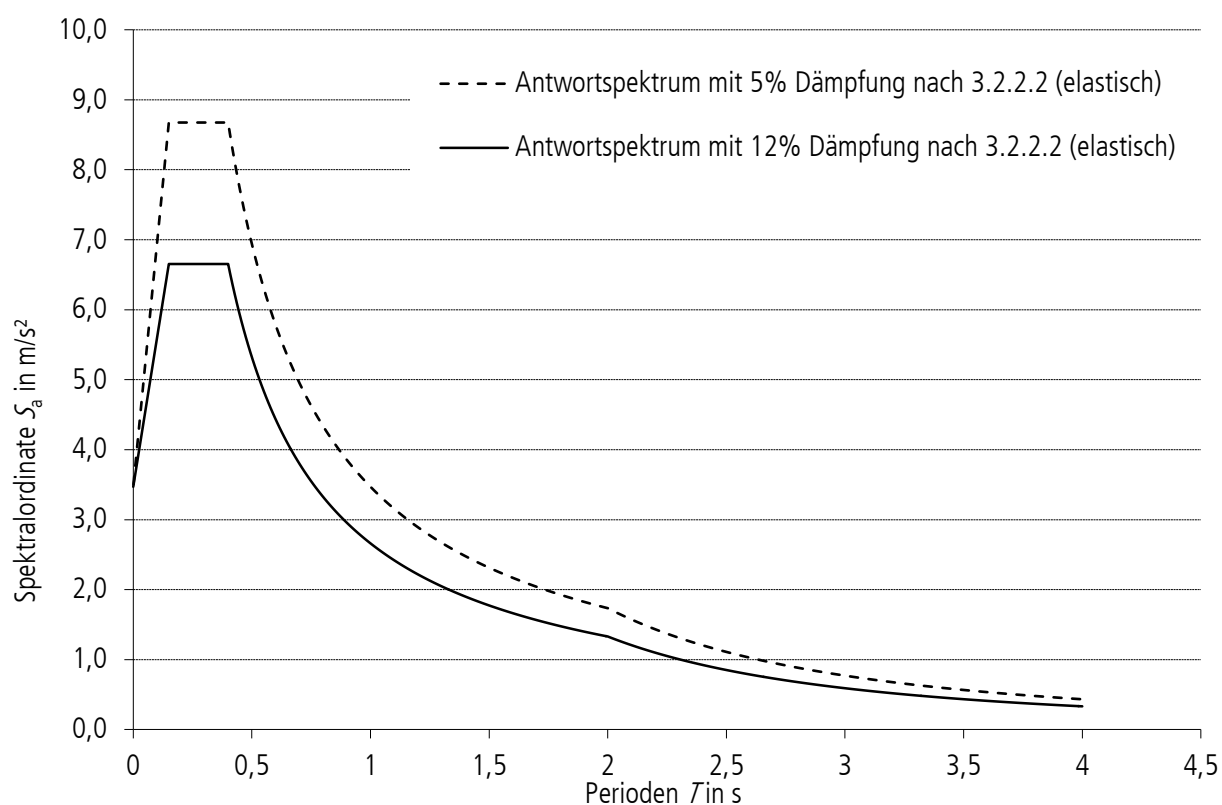


Bild D.1 Spektralbeschleunigungs-Perioden-Diagramm des äquivalenten Einmassenschwingers auf Basis der Werte aus Tabelle D.2.



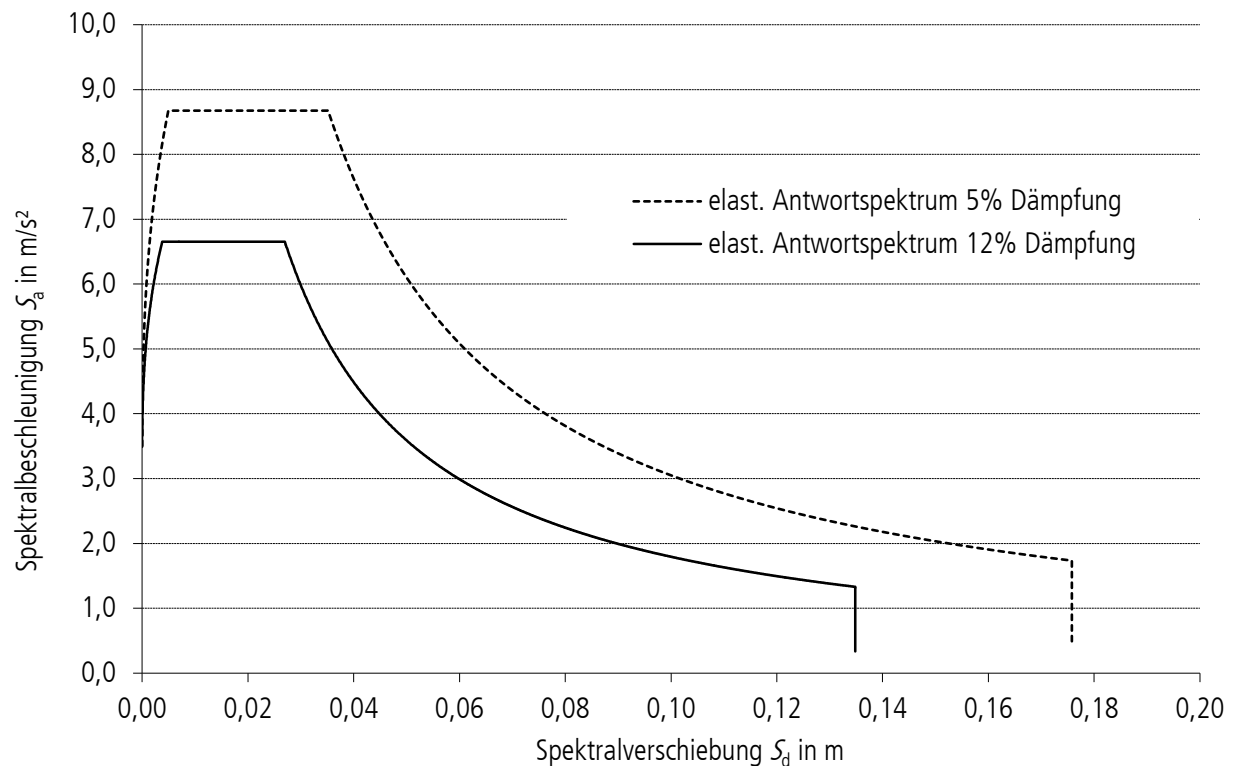


Bild D.2 Spektralbeschleunigungs-Spektralverschiebungs-Diagramm des Antwortspektrums eines äquivalenten EMS. Darstellung einer viskosen Dämpfung von 5% und einer viskosen Dämpfung von 12%.

Tabelle D.3 Maximale effektive Masse der Modalform der Untersuchungen an Wandscheiben mit Abmessung 2,50 m x 2,50 m und Beplankung aus Gipsplatten nach DIN EN 520.

Versuch-Nr.	Werkstoff / Beplankung	Verbindungs- mittel	Verbindungsmittel- abstand	maximale effektive Masse der Modalform $m_{j,eff}$ [to/m]
DF-12,5 H-1-2-1	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 12,5 mm beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	2,22
DF-12,5 H-1-2-2	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 12,5 mm beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	2,68
DF-18,0 H-1-2-2	Gipsplatte Typ DF Nenndicke 18,0 mm beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	3,26
DFH2IR-12,5 H-1-2-2	Gipsplatte Typ DFH2IR Nenndicke 12,5 beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	2,67
DFH2IR-12,5 H-1-1-2	Gipsplatte Typ DFH2IR Nenndicke 12,5 einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	1,80
DEFH1IR-12,5 H-1-1-1	Gipsplatte Typ DEFH1IR Nenndicke 12,5 einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	2,55

Tabelle D.4 Maximale effektive Masse der Modalform der Untersuchungen an Wandscheiben mit Abmessung 2,50 m x 2,50 m und Beplankung aus Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283.

Versuch-Nr.	Werkstoff / Beplankung	Verbindungs- mittel	Verbindungsmittel- abstand	maximale effektive Masse der Modalform $m_{j,eff}$ [to/m]
GF-W2-12,5 H-1-1-1	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	5,05
GF-W2-15,0 H-1-1-1	Gipsfaserplatte Typ GF-W2 Nenndicke 15,0 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	4,75
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-2	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	5,40
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-1-1	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	4,47
GF-C1-I-W2-12,5 H-1-2-2	Gipsfaserplatte Typ GF-C1-I-W2 Nenndicke 12,5 mm beidseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 50	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	10,75
GF-I-W2-C1-12,5 H-1-2-2	Gipsfaserplatte Typ GF-I-W2-C1 Nenndicke 12,5 mm einseitige Beplankung	Klammer 1,53 x 45	50 mm Randrippe 150 mm Mittelrippe	7,70